



## Assessment of Desertification and Drought Risks and Ecosystem Resilience Using Spatial Modeling and Explainable Machine Learning: Kalar District as an Applied Study

Asst. Prof . Dr.Ali Suleiman Erzik Al-Karbouli  
Education General  
Directorate of Anbar Education  
[alisu8720@gmail.com](mailto:alisu8720@gmail.com)

Dr. Reem Abdul Razzaq Hassoubi  
General Directorate of Education in Diyala  
[reem.abd191@gmail.com](mailto:reem.abd191@gmail.com)

**Abstract:** This study aims to assess the dynamics of desertification and drought risks and to analyze ecosystem resilience in the Kalar District, Sulaymaniyah Governorate. It employs multi-indicator spatial modeling and remote sensing techniques over the period (2000–2025). The analysis is based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to extract long-term trends, along with indicators of climatic sensitivity, resistance, and recovery rate, culminating in the development of a temporally validated composite desertification risk model. Climatic analysis indicated that the year (2006) represented a relatively wet condition, whereas (2008) marked a severe drought shock characterized by a significant decline in precipitation. Resistance analysis for the period (2006–2008) revealed an immediate decline in certain environmental sectors, reflecting weak initial response in specific areas. However, recovery analysis for the period (2008–2018) demonstrated the ecosystem's capacity to regain a substantial portion of its structural balance, indicating a moderate level of structural resilience across the region.

Long-term trend analysis (2000–2025) showed that most of the study area experienced a slight improvement in vegetation cover, covering an area of (1697.88 km<sup>2</sup>), compared to slight degradation over (51.26 km<sup>2</sup>) and very limited significant degradation (0.61 km<sup>2</sup>). This suggests the absence of a comprehensive desertification trajectory during the study period. Following the construction of the composite risk model, fragile areas were estimated at (123.96 km<sup>2</sup>), while highly fragile areas accounted for (0.13 km<sup>2</sup>). For temporal validation, vegetation response was analyzed between a wet year (2018) and a climatically stressful year (2021). The results showed a clear decline over (75.56 km<sup>2</sup>) and slight degradation over (1428.30 km<sup>2</sup>). Overlay analysis between the risk model and 2021 vegetation response revealed that confirmed risk zones covered (106.47 km<sup>2</sup>), aligning with the structural vulnerability zones identified by the resilience model. The findings indicate that the ecosystem in Kalar District does not suffer from widespread desertification; however, it contains localized pockets of vulnerability that require precise adaptive management. This underscores the importance of integrating short-term climatic shock analysis with long-term trends in assessing desertification risk.

**Keywords:** Desertification, drought risk, ecosystem resilience, spatial modeling, NDVI, climatic sensitivity, environmental vulnerability.

تقييم مخاطر التصحر والجفاف ومرونة النظم البيئية باستخدام النمذجة المكانية والتعلم الآلي القابل للتفسير قضاء كلار دراسة تطبيقية

م.د. ريم عبد الرزاق حسوبي

المدرية العامة لتربية ديالى

[reem.abd191@gmail.com](mailto:reem.abd191@gmail.com)

أ.م.د. علي سليمان ارزيك الكربولي

المدرية العامة لتربية الانبار

[alisu8720@gmail.com](mailto:alisu8720@gmail.com)

**المخلص:** يهدف البحث إلى تقييم ديناميكيات مخاطر التصحر والجفاف وتحليل مرونة النظام البيئي في قضاء كلار التابع لمحافظة السليمانية، عبر توظيف النمذجة المكانية متعددة المؤشرات وتقنيات الاستشعار عن بعد للفترة (٢٠٠٠-٢٠٢٥) معتمدين على تحليل مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) لاستخراج اتجاهات التغيير طويلة الأمد، ومؤشرات الحساسية المناخية، والمقاومة، وسرعة التعافي، وصولاً إلى بناء نموذج مركب لمخاطر التصحر قابل للتحقق الزمني.

أظهر التحليل المناخي أن سنة (٢٠٠٦) مثلت حالة رطوبة نسبية، في حين مثلت سنة (٢٠٠٨) صدمة جفاف حادة بانخفاض كبير في كميات الأمطار، وقد كشف تحليل المقاومة للفترة (٢٠٠٦-٢٠٠٨) عن تراجع آني في بعض القطاعات البيئية، ما يعكس ضعف الاستجابة الأولية في مناطق محددة، غير أن تحليل التعافي للفترة (٢٠٠٨-٢٠١٨) بين قدرة النظام البيئي على استعادة جزء كبير من توازنه البيئي، الأمر الذي يؤكد وجود مرونة بنيوية متوسطة على مستوى الإقليم. أما تحليل الاتجاه طويل الأمد (٢٠٠٠-٢٠٢٥) فأظهر أن غالبية مساحة المنطقة شهدت تحسناً طفيفاً في الغطاء النباتي بلغت مساحته (١٦٩٧.٨٨ كم<sup>٢</sup>)، مقابل تدهور طفيف بمساحة (٥١.٢٦ كم<sup>٢</sup>) وتدهور واضح محدود جداً (٠.٦١ كم<sup>٢</sup>)، مما يشير إلى عدم وجود مسار تصحري شامل خلال فترة الدراسة.

بعد بناء نموذج المخاطر المركبة، بلغت مساحة المناطق الهشة (١٢٣.٩٦ كم<sup>٢</sup>)، في حين بلغت المساحات شديدة الهشاشة (٠.١٣ كم<sup>٢</sup>). ولغرض التحقق الزمني من صلاحية النموذج، تم تحليل استجابة الغطاء النباتي بين سنة الرطوبة العالية (٢٠١٨) وسنة الإجهاد المناخي (٢٠٢١)، حيث أظهرت النتائج تراجعاً واضحاً بمساحة (٧٥.٥٦ كم<sup>٢</sup>) وتراجعاً طفيفاً بمساحة (١٤٢٨.٣٠ كم<sup>٢</sup>)، وعند إجراء التقاطع بين نموذج المخاطر واستجابة عام (٢٠٢١)، تبين أن مساحة مناطق الخطر المؤكد بلغت (١٠٦.٤٧ كم<sup>٢</sup>)، وهو ما يتطابق مع نطاقات الهشاشة البيئية التي كشفها نموذج المرونة.

تشير النتائج إلى أن النظام البيئي في قضاء كلار لا يعاني من تصحر واسع النطاق، إلا أنه يحتوي على جيوب هشاشة موضعية تتطلب إدارة تكيفية دقيقة، مما يؤكد أهمية الدمج بين تحليل الصدمات المناخية قصيرة الأمد والاتجاهات طويلة الأمد في تقييم مخاطر التصحر.

**الكلمات المفتاحية:** التصحر، مخاطر الجفاف، مرونة النظم البيئية، النمذجة المكانية، مؤشر الغطاء النباتي (NDVI)، الحساسية المناخية، الهشاشة البيئية.

**المقدمة:** لم يعد التصحر يفهم بوصفه مجرد تحولٍ بيئي نحو الجفاف أو انحسار الغطاء النباتي، بل أصبح ينظر إليه كعملية ديناميكية مركبة تتداخل فيها العوامل المناخية مع البنى البيئية والاجتماعية والاقتصادية. فقد عرفت اتفاقية الأمم المتحدة لمكافحة التصحر (UNCCD) التصحر بأنه تدهور الأراضي في المناطق الجافة وشبه الجافة نتيجة التغيرات المناخية والأنشطة البشرية مما يشير إلى طبيعته المركبة التدريجية

الغير خطية التي تتراكم آثارها عبر الزمن، فالتصحّر لا يمثل حدثاً مفاجئاً، بل نتاج تحولات في العتبات البيئية بسبب اختلال التوازن بين القدرة الإنتاجية للنظام وضغوط الاستخدام البشري والمناخي، وهذا يعني أن التصحر يرتبط بمفهوم العتبة حيث قد يبقى النظام مستقراً ظاهرياً إلى أن يتجاوز حداً معيناً فيدخل في مسار تدهوري. (Reynolds, 2007 p 847)

أن التصحر في البيئات شبه الجافة لا يقاس فقط بانخفاض المطر، بل بمدى قدرة الغطاء النباتي على التكيف مع التذبذب المناخي فمناطق شمال العراق، رغم تمتعها بهوامش مطرية أفضل نسبياً من الوسط والجنوب، إلا أنها تبقى عرضة لعمليات تدهور موضعية نتيجة التذبذب المناخي الحاد وسوء الإدارة الأرضية من هنا يتضح أن فهم التصحر لا يمكن أن يكون وصفيًا، بل يجب أن يكون تحليلياً ديناميكياً، يستند إلى قياس قابلية النظام البيئي للتأثر والاستجابة. (الشليبي، ٢٠١٤، صفحة ٧٩) أما على مستوى القياس الكمي، فقد أسهمت تقنيات الاستشعار عن بعد في إحداث تحول نوعي في دراسة التصحر، حيث يتيح مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI) رصد الاستجابة الزمنية للنظام البيئي للتغيرات المناخية فالدراسات الحديثة تشير إلى أن تحليل الاتجاهات طويلة الأمد لمؤشر (NDVI) يوفر مؤشراً موثقاً لمسارات التدهور أو التعافي البيئي (Pettorelli, 2005, p. 613).

أما الجفاف في البيئات شبه الجافة ليس ظاهرة استثنائية، بل عنصر بنيوي في النظام المناخي، إلا أن شدته وتكراره وتزامنه مع ضغوط أخرى هو ما يحدد أثره البيئي فالجفاف يمثل ظاهرة زاحفة ذات تأثير تراكمي يصعب تحديد بدايتها ونهايتها بدقة (Wilhite, 1985, p. 114) ففي البيئات الجبلية وشبه الجبلية في العراق، يتسم الجفاف بطابع تذبذبي حاد، حيث قد تتعاقب سنوات رطبة وأخرى جافة خلال فترة زمنية قصيرة، ما يؤدي إلى صدمات بيئية متكررة (ابوالعز، ٢٠٠٦، صفحة ١٢٢) وبالعودة إلى بيانات الدراسة، مثلت سنة (٢٠٠٦) حالة رطوبة نسبية، في حين شكلت سنة (٢٠٠٨) صدمة جفاف حادة، الأمر الذي يتيح دراسة اختبار الصدمة ضمن إطار تحليلي لقياس مقاومة النظام البيئي.

أما مرونة النظم البيئية فقد ظهر مفهومها في أعمال (Holling) الذي وصفها بقدرة النظام على امتصاص الاضطرابات وإعادة تنظيم ذاته دون الانتقال إلى حالة بديلة (Holling, 1973, p. 14) ويختلف هذا المفهوم عن الاستقرار البسيط، إذ إن النظام قد يتذبذب لكنه يظل ضمن نطاق وظيفي مقبول ويرى (Walker) أن المرونة تتكون من ثلاثة عناصر: المقاومة (Resistanc) ، وسرعة التعافي (Recovery) والقدرة على إعادة التنظيم. (Walker, 2005, p. 63) (Reorganization)

أما النمذجة المكانية بوصفها أداة تفسيرية فقد أصبحت النمذجة المكانية في العقود الأخيرة أداة مركزية في تحليل مخاطر التصحر تسمح بدمج مؤشرات متعددة في إطار مكاني موحد. ويرى (Lambin) أن دمج المؤشرات الحيوية والمناخية ضمن نموذج مكاني يقلل من التحيز الناتج عن الاعتماد على مؤشر واحد (Lambin, Geist, & Lepers, 2005, p. 228)

أولاً: مشكلة البحث: أن التدهور البيئي لا يحدث بصورة خطية أو تراكمية واضحة، بل يتخذ شكل استجابات متذبذبة ترتبط بشدة الصدمة المناخية وحساسية النظام البيئي فالنظم شبه الجافة تظهر استقراراً ظاهرياً في الاتجاه طويل الأمد، بينما تخفي في بنيتها مناطق هشاشة موضوعية قابلة للانزلاق نحو مسارات تصحرية عند تعرضها لصدمة مناخية متكررة، كما حدث بين عامي (٢٠٠٦-٢٠٠٨) ومن هنا تتبلور المشكلة البحثية في التساؤل الآتي: هل يعكس الاتجاه طويل الأمد للغطاء النباتي في قضاء كلار مسارا تصحرية تدريجياً، أم أن النظام البيئي يمتلك مرونة بنيوية تمكنه من امتصاص الصدمات المناخية دون الانتقال إلى حالة تدهور دائمة؟ ويتفرع عن هذا التساؤل الإشكالات الفرعية:

١. ما مستوى الحساسية المناخية للنظام البيئي تجاه التذبذب المطري؟
٢. إلى أي مدى أثرت صدمة الجفاف عام (٢٠٠٨) في البنية النباتية؟
٣. هل تمكن النظام من التعافي خلال العقد اللاحق (٢٠٠٨-٢٠١٨)؟
٤. هل تتطابق مناطق الهشاشة البنيوية مع مناطق التراجع الفعلي خلال موجة الإجهاد (٢٠٢١)؟
٥. هل يمكن بناء نموذج مكاني تفسيري يدمج بين الاتجاه، الحساسية، المقاومة، والتعافي لتحديد مخاطر التصحر بدقة مكانية؟

ثانياً: فرضية البحث: يمتلك النظام البيئي في قضاء كلار مرونة بنيوية متوسطة تمكنه من امتصاص الصدمات المناخية قصيرة الأمد دون أن يسلك مسارا تصحرية طويل الأمد، مع وجود جيوب مكانية محدودة ذات هشاشة مرتفعة، فقد أثرت صدمة الجفاف عام (٢٠٠٨) في الغطاء النباتي تأثيراً أنياً واضحاً في بعض القطاعات، إلا أن هذا التأثير لم يكن شاملاً على مستوى المنطقة ككل، كما وأظهر النظام البيئي قدرة على التعافي التدريجي خلال الفترة (٢٠٠٨-٢٠١٨)، بما يعكس وجود مرونة بيئية متوسطة، مع وجود تباين في الحساسية المناخية مكانياً داخل منطقة البحث، مع وجود نطاقات ذات استجابة مرتفعة للتذبذب المطري، مما جعل مناطق الهشاشة البنيوية الناتجة عن نموذج المرونة المركب مع مناطق التراجع الفعلي تتقاطع خلال موجة الإجهاد المناخي الحديثة (٢٠٢١).

ثالثاً: أهداف البحث:

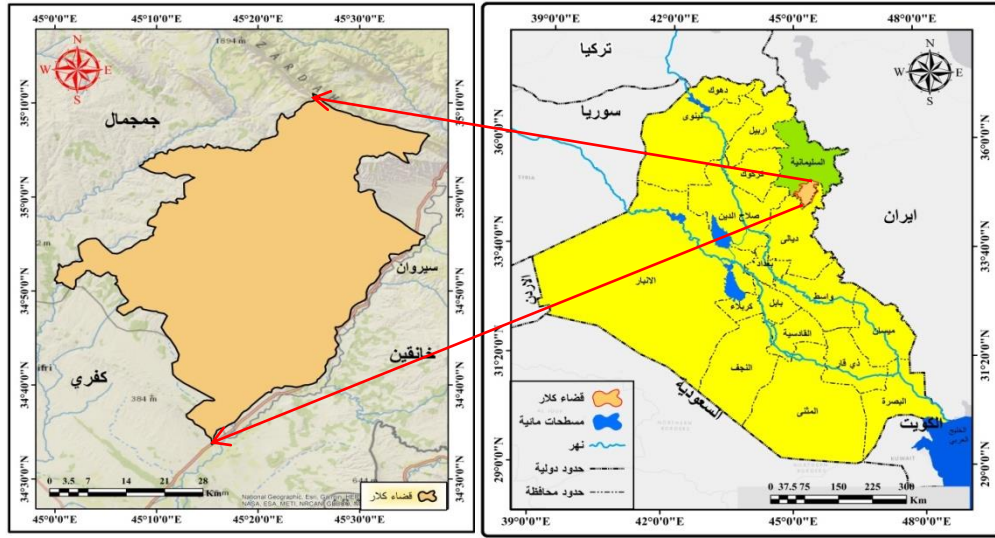
١. تحليل الاتجاه الزمني طويل الأمد للتغير في الغطاء النباتي في قضاء كلار خلال الفترة (٢٠٠٠-٢٠٢٥)، بهدف الكشف عن المسار العام للتغير البيئي.
٢. قياس أثر الصدمات المناخية المفاجئة في النظام البيئي، من خلال تحليل الاستجابة الفورية للغطاء النباتي بين عامي (٢٠٠٦-٢٠٠٨) بوصفها مرحلة اختبار للمقاومة البيئية.
٣. تقييم قدرة النظام البيئي على التعافي بعد الصدمة المناخية، وذلك عبر تحليل التغير في الغطاء النباتي خلال الفترة (٢٠٠٨-٢٠١٨).
٤. تحليل درجة الحساسية المناخية للنظام البيئي من خلال دراسة التذبذب الزمني في مؤشر الغطاء النباتي، وتحديد المناطق الأكثر استجابة للتغيرات المناخية.
٥. بناء نموذج مكاني مركب لمخاطر التصحر يعتمد على دمج مؤشرات الاتجاه، الحساسية، المقاومة، والتعافي، بهدف تحديد نطاقات الهشاشة البيئية بدقة مكانية.

**رابعاً: أهمية البحث:** تتبع أهمية هذا البحث من سعيه إلى معالجة قضية بيئية معقدة تتمثل في مخاطر التصحر والجفاف في البيئات شبه الجافة، وذلك من خلال تبني مقاربة تحليلية تجمع بين التحليل الزمني والنمذجة المكانية لفهم ديناميكيات التغير البيئي في المناطق شبه الجافة من خلال دمج تحليل الاتجاهات طويلة الأمد مع تحليل الصدمات المناخية قصيرة الأمد. لتقديم إطار تحليلي قادر على قياس مرونة النظم البيئية اعتماداً على مؤشرات كمية مستمدة من بيانات الاستشعار عن بعد ومن المؤمل ان تساعد نتائج الدراسة في تحديد مناطق الهشاشة البيئية داخل قضاء كلار، مما يوفر قاعدة معلومات علمية يمكن الاستفادة منها في وضع استراتيجيات إدارة الموارد الطبيعية والتخطيط البيئي المستدام.

#### **المبحث الاول: الخصائص الطبيعية لمنطقة البحث**

**أولاً: الموقع الجغرافي:** يقع قضاء كلار في الجزء الجنوبي الغربي من محافظة السليمانية، ويعد أحد المراكز الحضرية الرئيسية في منطقة كرميان ويحد القضاء من الشمال قضاء كفري، ومن الشرق الحدود الدولية مع الجمهورية الإسلامية الإيرانية، بينما يحده من الغرب قضاء طوزخورماتو، ومن الجنوب محافظة ديالى، اما من الناحية الفلكية فيمتد بين دائرتي عرض (٣٤°٣٠' - ٣٥°٠٠' شمالاً) وخطي طول (٤٥°٠٠' - ٤٥°٤٥' شرقاً)، ينظر الخريطة (١) مما يضعه ضمن المنطقة الانتقالية التي تتداخل فيها التأثيرات المناخية الجبلية مع الخصائص المناخية شبه الجافة

خريطة (١) موقع منطقة البحث



المصدر: بالاعتماد على المرئية الفضائية DEM2007 باستخدام برنامج ARC GIS

**ثانياً: المناخ:** ينتمي مناخ قضاء كلار إلى المناخ شبه الجاف الحار، الذي يتسم بتباين موسمي واضح في درجات الحرارة وكميات الأمطار ويمثل هذا التذبذب المناخي أحد العوامل الرئيسة التي تؤثر في استجابة الغطاء النباتي، إذ إن السنوات الرطبة قد تؤدي إلى ازدياد النشاط النباتي، في حين تتسبب سنوات الجفاف في تراجع الغطاء النباتي بصورة ملحوظة، فلا يمكن فهم ديناميكيات الغطاء النباتي أو تفسير أنماط المرونة البيئية ومخاطر التصحر في قضاء كلار دون الانطلاق من البنية المناخية التي تشكل الإطار الحاكم لسلوك النظام البيئي. فالمناخ في البيئات شبه الجافة لا يمثل مجرد خلفية طبيعية، بل هو قوة فاعلة تحدد إيقاع التوازن والاختلال، إذ يتجلى تأثيره من خلال التفاعل المستمر بين عنصرين أساسيين (الأمطار ودرجات الحرارة) .

جدول (١) المجاميع السنوية للأمطار ومعدلات درجات الحرارة في قضاء كلار للفترة (٢٠٠٠-٢٠٢٥)

السنة	الأمطار	الحرارة
٢٠٢٥	٥٣٨	٢٢.٧
٢٠٢٤	٦٣٦	٢١.٤١
٢٠٢٣	٦٣٤	٢١.٥١
٢٠٢٢	٤٩١	٢١.٩٦
٢٠٢١	٤١٦	٢٢.٦٥
٢٠٢٠	٦١١	٢١.٢٨
٢٠١٩	٧٥٦	٢٢.٨٤
٢٠١٨	٩٧٦	٢١.٦٣
٢٠١٧	٨٧٧	٢١.٥٩
٢٠١٦	٥٥٢	٢١.١٢
٢٠١٥	٤٦٩	٢١.٢٨
٢٠١٤	٤٧٤	٢١.٥
٢٠١٣	٥٦٦	٢٢.٧٨
٢٠١٢	٥٦٨	٢١.٦
٢٠١١	٣٣٢	٢٢.١٧
٢٠١٠	٤٧٤	٢٢.٤٧
٢٠٠٩	٤١١	٢٢.٨٢
٢٠٠٨	٣٩٧	٢١.٣٥
٢٠٠٧	٥١١	٢٢.٨٦
٢٠٠٦	٦٤٧	٢٢.٧٢
٢٠٠٥	٤٩٥	٢٢.٩٩
٢٠٠٤	٤٨٤	٢٢.٦٧
٢٠٠٣	٤٤٥	٢٢.٦٦
٢٠٠٢	٤٤٥	٢٢.٦١
٢٠٠١	٤٨٧	٢١.٥١
٢٠٠٠	٤٩٩	٢١.٢٥

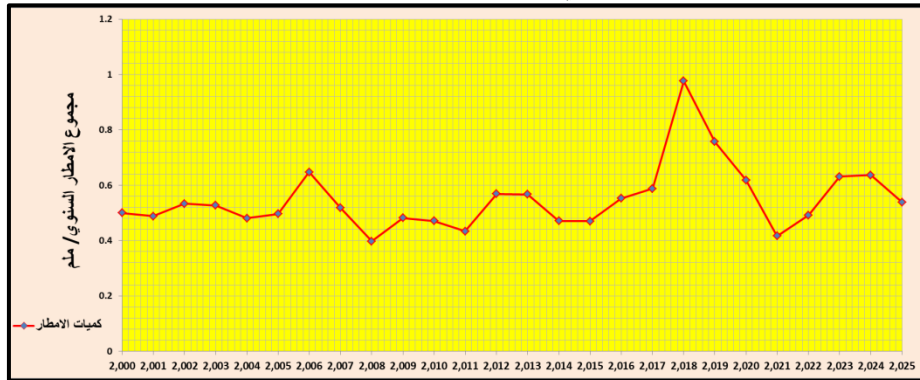
المصدر: الهيئة العامة لأنواء الجوية والرصد الزلزالي، محطة كلار بيانات غير منشورة ٢٠٢٥ .

تكشف قراءة الجدول (١) عن حقيقة مناخية أساسية مفادها أن النظام البيئي في قضاء كلار لا يخضع لمسار مناخي ثابت، بل يتحرك ضمن حالة من التذبذب الديناميكي الذي يتسم بعدم الانتظام، فالأمطار

## وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٢٠٢٦/٥/٧-٦

العامل المناخي الأكثر تأثيراً في ديناميكيات الغطاء النباتي في المناطق شبه الجافة تشير البيانات إلى أنها في قضاء كلار تتسم بطابع موسمي واضح، حيث تتركز في فصل الشتاء، في حين تتعدم تقريباً خلال فصل الصيف، ويؤدي هذا التوزيع غير المتوازن إلى اعتماد الغطاء النباتي على فترة زمنية محدودة للنمو، مما يجعله حساساً لأي تغيير في كمياتها أو توقيتها، وهو ما يفسر التذبذب في قيم مؤشر (NDVI) التي أظهرتها نتائج الدراسة فهي لا تتوزع وفق نمط خطي، بل تتأرجح بين سنوات جافة وأخرى رطبة، كما يظهر بوضوح في الشكل (١) الخاص بالأمطار، حيث تنخفض القيم إلى حدودها الدنيا في عام (٢٠٠٨) عند نحو (٣٩٧ ملم)، ثم ترتفع بشكل استثنائي في عام (٢٠١٨) لتصل إلى (٩٧٦ ملم) إن هذا التباين لا يمكن تفسيره عده تغيير عابر، بل هو صورة حقيقية تعكس بنية مناخية غير مستقرة تخضع النظام البيئي لحالة من الاختبار المستمر بين التدهور والتعافي. ففي عام (٢٠٠٨)، لا تمثل قلة الأمطار مجرد انخفاض عددي، بل تعني من منظور بيئي انقطاع الإمداد المائي الذي تعتمد عليه النباتات، وهو ما أدى إلى تراجع النشاط الحيوي ويزداد هذا الأثر حدة عندما يتزامن مع ارتفاع نسبي في درجات الحرارة، كما تشير بيانات نفس العام، مما عزز من فقدان الرطوبة عبر التبخر، ووضع النظام البيئي تحت ضغط مزدوج، في المقابل، يمثل عام (٢٠١٨) حالة معاكسة تماماً، إذ أدى الارتفاع الكبير في كميات الأمطار إلى إعادة تغذية النظام البيئي، ليس فقط من حيث زيادة الرطوبة، بل أيضاً من حيث استعادة التوازن البيئي، ويعكس التغيير قدرة النظام البيئي على الاستجابة الإيجابية عند توفر الظروف المناخية الملائمة، مما يفسر نتائج التعافي التي أظهرتها الدراسة، حيث يعكس هذا التباين الحاد الطبيعة المتذبذبة للنظام المطري في المنطقة إلى حدوث صدمات بيئية في الغطاء النباتي، حيث تستجيب النباتات سريعاً للتغير في توفر المياه، مما يجعل مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) أداة فعالة لرصد هذه الاستجابة في الغطاء النباتي (Pettorelli, 2005, p. 612).

شكل (١) التذبذب السنوي في كميات امطار منطقة البحث (٢٠٢٥ - ٢٠٠٠)

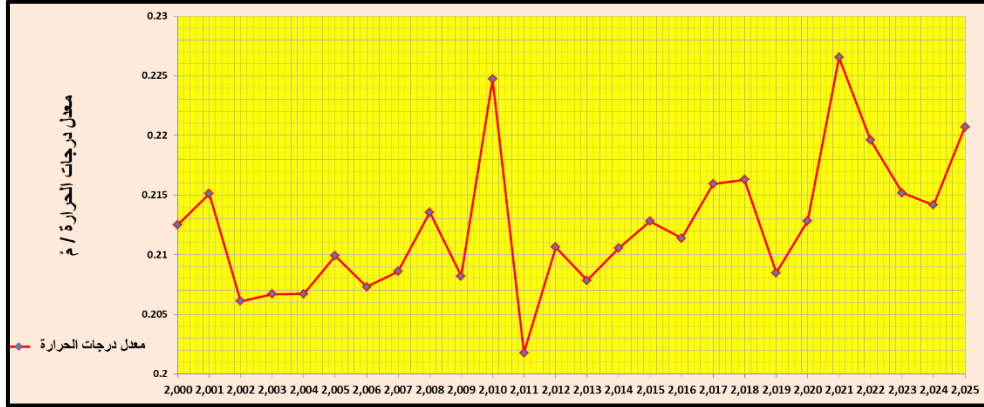


المصدر: بالاعتماد على بيانات الجدول (١)

## وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٦-٧/٥/٢٠٢٦

أما درجات الحرارة، فتتسم بارتفاعها خلال فصل الصيف وانخفاضها النسبي خلال الشتاء فقد تتجاوز درجات الحرارة العظمى في الصيف ( $40^{\circ}\text{C}$ )، في حين تنخفض في فصل الشتاء إلى نحو ( $10^{\circ}\text{C}$ ) في المتوسط وعلى الرغم من أنها تبدو أكثر استقراراً مقارنة بالأمطار، إلا أنها تلعب دوراً حاسماً بوصفها عاملاً مضاعفاً للتأثير فارتفاعها في بعض السنوات، مثل (٢٠١٠) و(٢٠٢١)، لا يؤدي بمفرده إلى تدهور النظام البيئي، لكنه يفاقم تأثير انخفاض الأمطار، مما يسرع من ظهور الإجهاد البيئي.

شكل (٢) التذبذب السنوي في معدل درجات حرارة منطقة البحث (٢٠٠٠ - ٢٠٢٥)



المصدر: بالاعتماد على بيانات الجدول (١)

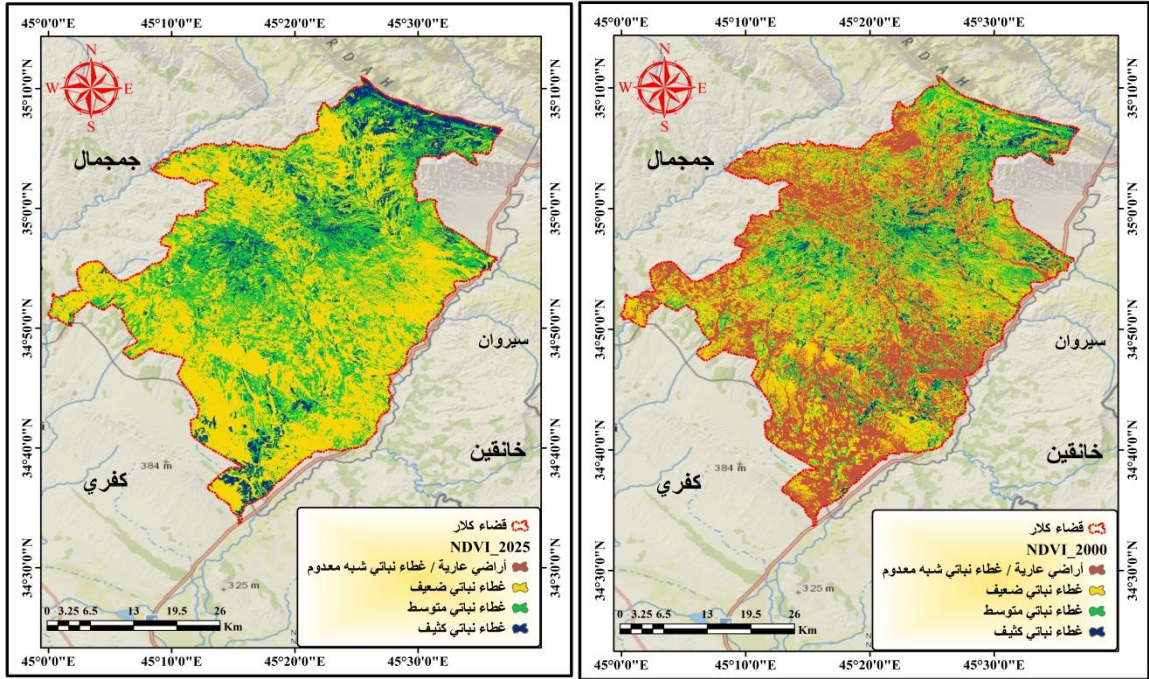
وهنا يمكن القول إن الحرارة لا تعمل كعامل مستقل، بل كعامل يعيد تشكيل أثر الأمطار ويضخمه وبهذا المعنى، لا يمكن النظر إلى المناخ في كلار بوصفه مجرد مجموعة من القيم الرقمية، بل بوصفه نظاماً ديناميكياً يتحكم في إيقاع الحياة النباتية، فالأمطار تمثل المحرك الأساسي للنظام البيئي، في حين تمثل الحرارة عامل التعديل والتسريع، ويؤدي التفاعل بينهما إلى إنتاج أنماط متعددة من الاستقرار أو الهشاشة.

### المبحث الثاني: تحليل طبيعة اتجاه التغير في الغطاء النباتي في قضاء كلار (٢٠٠٠-٢٠٢٥)

#### أولاً: واقع الغطاء النباتي (٢٠٠٠-٢٠٢٥)

تمثل خرائط الغطاء النباتي (NDVI) أداة كمية فعالة لتحليل ديناميكيات النظم البيئية، إذ تعكس هذه الخرائط التباين المكاني في النشاط الحيوي للنباتات، وتتيح تقييم مستويات الكثافة النباتية ضمن فئات متدرجة تبدأ من الأراضي العارية وتنتهي بالمناطق ذات الغطاء النباتي الكثيف. وبذلك، فإنها توفر أساساً علمياً لفهم استجابة النظام البيئي للتغيرات المناخية، لاسيما التذبذب في كميات الأمطار وحدث موجات الجفاف، ولبيان واقع الغطاء النباتي تم تحليل حالتين زمنيتين تمثلان بداية ونهاية فترة الدراسة (٢٠٠٠ و٢٠٢٥)، بهدف الكشف عن طبيعة التغير طويل الأمد في الغطاء النباتي حيث بينت النتائج التي تظهرها الخريطين (٢ و ٣) والجدول (٢) مايلي:

خريطة (٢) الغطاء النباتي لسنة (٢٠٠٠) خريطة (٣) الغطاء النباتي لسنة (٢٠٢٥)



المصدر: بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي land sat 8 ومؤشر (NDVI) لعامي (٢٠٠٠-٢٠٢٥)

جدول (٢): توزيع مستويات الكثافة النباتية لعام ٢٠٠٠

الفئة	سنة ٢٠٠٠		سنة ٢٠٢٥		مستوى الكثافة النباتية
	المساحة (كم <sup>٢</sup> )	النسبة	المساحة (كم <sup>٢</sup> )	النسبة	
١	٦١٢,٣٧	٣٤,٩	١,٢٥	٠,٠٧	أراضي عارية/ غطاء ضعيف جداً
٢	٦٩٥,٢٠	٣٩,٦	٩٩٢,٧٤	٥٦,٦	غطاء نباتي ضعيف
٣	٣٦٠,٢٠	٢٠,٦	٦٠٦,٥٤	٣٤,٦	غطاء نباتي متوسط
٤	٨٧	٥	١٥٤,٩	٨,٨	غطاء نباتي كثيف
المجموع	١٧٥٥,٣١	%١٠٠	١٧٥٥,٣١	%١٠٠	—

المصدر: بالاعتماد على بيانات الخريطين (١)

في عام (٢٠٠٠) كانت هناك سيطرة واضحة للفئات ذات الكثافة النباتية المنخفضة، إذ تشكل الفئات الأولى والثانية ما نسبته (٧٤.٥%) من إجمالي المساحة، وهو ما يدل على أن النظام البيئي في بداية فترة الدراسة كان يتسم بضعف الإنتاجية النباتية وارتفاع الحساسية للتغيرات المناخية. في المقابل، تقتصر المناطق ذات الغطاء النباتي الكثيف على نطاق محدود جداً (٥.٠%)، مما يشير إلى محدودية البيئات المستقرة بيئياً، أما نتائج عام (٢٠٢٥) فتشير إلى تحول ملحوظ في بنية الغطاء النباتي، حيث انخفضت المساحات العارية بشكل كبير لتصل إلى (٠.٠٧%) فقط، مقابل ارتفاع واضح في الفئات النباتية، وخاصة الفئة الضعيفة التي أصبحت تمثل (٥٦.٦%) من المساحة الكلية. كما ارتفعت الفئة المتوسطة إلى (٣٤.٦%)، والفئة الكثيفة إلى (٨.٨%)، وهو ما يعكس تحسناً نسبياً في النشاط النباتي إلا أن هذا التحسن يتسم بطابع غير مكتمل، حيث لا تزال الفئة الضعيفة هي المسيطرة، مما يدل على استمرار حالة من الهشاشة البيئية وتكشف المقارنة بين عامي (٢٠٠٠-٢٠٢٥) عن تحول جوهري في توزيع الغطاء النباتي،

## وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٢٠٢٦/٥/٧-٦

تمثل أساساً في تراجع حاد في الأراضي العارية من (٣٤.٩ - ٠.٠٧٪) مع زيادة كبيرة في الغطاء النباتي الضعيف من (٣٩.٦ - ٥٦.٦٪) يرافقها تحسن في الغطاء المتوسط من (٢٠.٦ - ٣٤.٦٪) مع نمو محدود في الغطاء الكثيف من (٥ - ٨.٨٪) حيث يشير هذا التحول إلى انتقال النظام البيئي من حالة ضعف حاد إلى حالة استقرار نسبي هش، حيث تم تعويض جزء كبير من المناطق العارية بغطاء نباتي، إلا أن هذا الغطاء بقي في مستويات منخفضة إلى متوسطة ويمكن تفسير هذه التحولات في ضوء التذبذب المناخي خلال فترة الدراسة، حيث ساهمت السنوات الرطبة في تحسين الغطاء النباتي، بينما حدثت فترات الجفاف من انتقاله إلى مستويات كثافة أعلى. ويعكس ذلك توازناً دقيقاً بين الضغط المناخي (الجفاف) وقدرة النظام البيئي على الاستجابة (المرونة) .

### ثانياً: تحليل الاتجاه الزمني للغطاء (٢٠٢٥-٢٠٠٠)

يعد تحليل الاتجاه الزمني للغطاء النباتي أحد الأدوات الأساسية في تقييم التغيرات البيئية طويلة الأمد في المناطق الجافة وشبه الجافة فالتغير في الغطاء النباتي لا يعكس فقط التباين المناخي السنوي، بل يمثل مؤشراً تراكمياً لحالة النظام البيئي واستجابته للتغيرات المناخية والضغط البيئية المختلفة ويمكن تحليل الاتجاه طويل الأمد للغطاء النباتي على المعادلة الآتية:

$$\text{Trend} = \text{NDVI}_2 - \text{NDVI}_1 \div T_1 - T_2$$

**NDVI1**: قيمة مؤشر الغطاء النباتي في بداية الفترة الزمنية (٢٠٠٠)

**NDVI2**: قيمة مؤشر الغطاء النباتي في نهاية الفترة الزمنية (٢٠٢٥)

**T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>** : طول الفترة الزمنية بين التاريخين (الفرق بالسنوات)

حيث ان تحليل الاتجاهات الزمنية لمؤشر الغطاء النباتي يوفر أداة فعالة لرصد مسارات التدهور أو التعافي البيئي عبر الزمن ويعتمد هذا التحليل على دراسة التغير التدريجي في قيم مؤشر خلال سلسلة زمنية طويلة نسبياً، بهدف تحديد ما إذا كان النظام البيئي يتجه نحو تحسن في الإنتاجية النباتية أو نحو تراجع تدريجي قد يشير إلى عمليات تدهور بيئي أو تصحر. (Pettorelli, 2005, p. 613). وفي هذا السياق، فإن تحليل الاتجاه طويل الأمد يوفر إطاراً تفسيريًا لفهم التحولات البنوية في النظام البيئي، إذ يسمح بالتمييز بين التذبذب السنوي الطبيعي في الغطاء النباتي وبين التغيرات الهيكلية طويلة الأمد. فالنظام البيئي قد يشهد تقلبات قصيرة الأمد نتيجة التذبذب المطري، إلا أن الاتجاه العام عبر فترة زمنية طويلة هو ما يعكس المسار الحقيقي للتغير البيئي (eynolds, et al., (2007)., p. 850)

وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٦-٧/٥/٢٠٢٦

جدول (٣) مساحة الاتجاه طويل الأمد للتغير في الغطاء النباتي في قضاء كلار

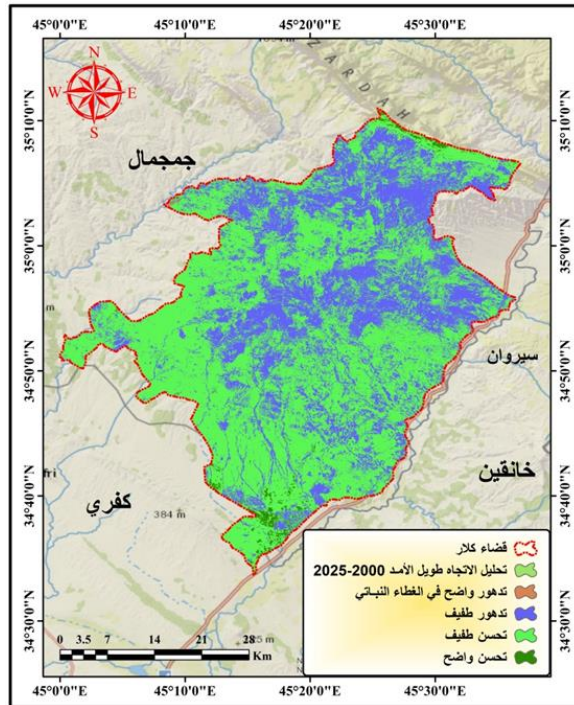
الفئة	١	٢	٣	٤
الوصف	تدهور واضح	تدهور طفيف	تحسن طفيف	تحسن واضح
المساحة (كم <sup>٢</sup> )	٠,٦١	٥١,٢٦	١٦٩٧,٨٨	٥,٥٦

المصدر: الخريطة (٣)

تشير نتائج تحليل الجدول (٣) والخريطة (٤) الاتجاه طويل الأمد إلى أن غالبية مساحة قضاء كلار تقع ضمن فئة التحسن الطفيف في الغطاء النباتي، حيث بلغت مساحتها (١٦٩٧.٨٨ كم<sup>٢</sup>)، وهو ما يمثل النسبة الأكبر من مساحة المنطقة المدروسة. ويعكس هذا النمط وجود اتجاه عام نحو استقرار أو تحسن تدريجي في النشاط النباتي خلال فترة الدراسة في المقابل، تظهر مساحات محدودة فقط ضمن فئتي التدهور الطفيف والتدهور الواضح، حيث بلغت مساحة التدهور الطفيف (٥١.٢٦ كم<sup>٢</sup>)، في حين لم تتجاوز مساحة التدهور الواضح (٠.٦١ كم<sup>٢</sup>). وتشير هذه النتائج إلى أن التدهور البيئي في منطقة البحث لا يتخذ طابعا واسع النطاق، بل يقتصر على نطاقات موضعية محدودة أما فئة التحسن الواضح فقد ظهرت في مساحات محدودة نسبيا بلغت (٥.٥٦ كم<sup>٢</sup>)، وهو ما قد يعكس تحسنا موضعيا في الإنتاجية النباتية نتيجة عوامل

محلية مثل التغير في استخدام الأرض أو تحسن الظروف المطرية خلال بعض السنوات

الخريطة (٤) تغير الغطاء النباتي طويل الأمد في قضاء كلار (٢٠٠٠-٢٠٢٥)



المصدر: بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي land sat 8 ومؤشر (NDVI) لعامي (٢٠٠٠-٢٠٢٥)

## وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٦-٧/٥/٢٠٢٦

ولتحقق من النتائج السابقة تم تحليل الفرق بين قيم مؤشر الغطاء النباتي لسنتي (٢٠٠٦، ٢٠٢١) حيث تمثل سنة (٢٠٠٦) مرحلة تسبق صدمة الجفاف التي شهدتها المنطقة عام (٢٠٠٨)، في حين تمثل سنة (٢٠٢١) مرحلة لاحقة شهدت استمرار التذبذب المناخي في المنطقة ويسمح هذا التحليل برصد التغيير طويل الأمد في النشاط النباتي خلال فترة زمنية تمتد لأكثر من عقد ونصف وقد نتج عن هذا التحليل خريطة الفرق التي توضح التوزيع المكاني للتغيرات التي طرأت على الغطاء النباتي في قضاء كلار خلال الفترة الممتدة بين عامي (٢٠٠٦-٢٠٢١)، حيث تم إعادة تصنيف القيم إلى أربع فئات تعكس مستويات مختلفة من التغيير في النشاط النباتي.

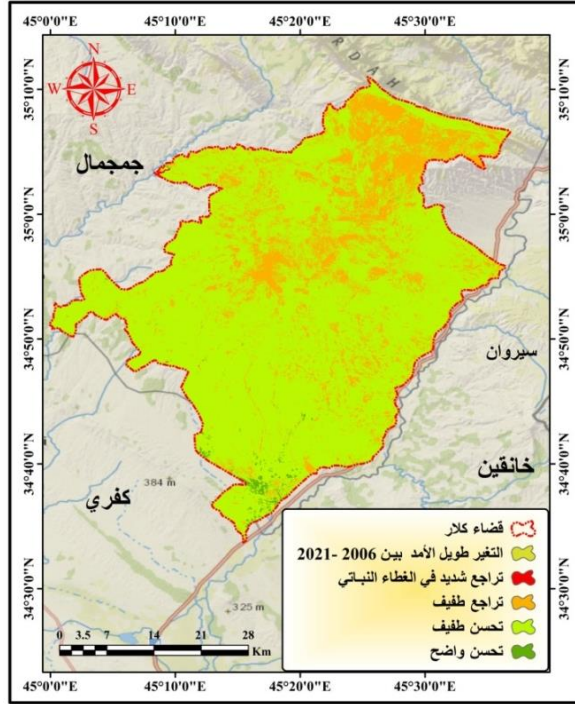
جدول (٤) التغيير طويل الأمد في الغطاء النباتي (٢٠٠٦ و ٢٠٢١) في قضاء كلار

الفئة	١	٢	٣	٤
الوصف	تدهور واضح	تراجع طفيف	تحسن طفيف	تحسن واضح
المساحة (كم <sup>٢</sup> )	٠,٨٥	٣٤٢,٩٢	١٤٠٤,١٣	١٢,٢٤

المصدر: بالاعتماد على الخريطة (٤)

يظهر الجدول (٤) والخريطة (٥) الفرق بين عامي (٢٠٠٦-٢٠٢١) وجود تباين مكاني واضح في التغيير الذي طرأ على الغطاء النباتي في قضاء كلار خلال هذه الفترة الزمنية. فقد تركزت المساحة الأكبر ضمن فئة التحسن الطفيف في الغطاء النباتي، حيث بلغت مساحتها نحو (١٤٠٤.١٣ كم<sup>٢</sup>) وهو ما يمثل الجزء الأكبر من مساحة المنطقة المدروسة. ويعكس هذا النمط تحسناً نسبياً في النشاط النباتي في أجزاء واسعة من المنطقة خلال الفترة الممتدة بين السنتين.

الخريطة (٥) تغير الغطاء النباتي طويل الأمد في قضاء كلار (٢٠٠٦-٢٠٢١)



المصدر: بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي land sat 8 ومؤشر (NDVI) لعامي (٢٠٠٦-٢٠٢١) في المقابل، ظهرت مساحات ملحوظة ضمن فئة التراجع الطفيف للغطاء النباتي بلغت (٣٤٢.٩٢ كم<sup>٢</sup>) وهو ما يشير إلى وجود مناطق شهدت انخفاضاً محدوداً في النشاط النباتي. وقد يرتبط هذا التراجع بالتذبذب المناخي الذي شهدته المنطقة خلال هذه الفترة، ولا سيما التغير في كميات الأمطار، أما فئة التحسن الواضح فقد ظهرت في مساحات محدودة بلغت (١٢.٢٤ كم<sup>٢</sup>)، وهي مناطق يبدو أن الظروف البيئية فيها كانت أكثر ملاءمة للنمو النباتي مقارنة ببقية أجزاء المنطقة، في حين كانت فئة التراجع الشديد محدودة للغاية، إذ لم تتجاوز مساحتها (٠.٨٥ كم<sup>٢</sup>) مما يشير إلى أن التدهور النباتي الحاد خلال هذه الفترة يقتصر على نطاقات مكانية صغيرة جداً داخل منطقة البحث وتشير هذه النتائج إلى أن التغير طويل الأمد في الغطاء النباتي في قضاء كلار بين عامي (٢٠٠٦-٢٠٢١) يتسم بوجود ميل عام نحو التحسن النسبي في النشاط النباتي، مع وجود مناطق محدودة شهدت تراجعاً طفيفاً في الغطاء النباتي مؤكدة ما أظهره تحليل الاتجاه طويل الأمد للغطاء النباتي، إذ تشير إلى أن النظام البيئي في منطقة البحث لا يعكس مساراً تصحرياً واسع النطاق، بل يتميز بدرجة من الاستقرار النسبي مع وجود تباين مكاني في استجابة الغطاء النباتي للتغيرات المناخية غير أن فهم ديناميكيات هذا التغير بصورة أدق يتطلب تحليل استجابة النظام البيئي لصدمة الجفاف التي حدثت عام (٢٠٠٨)، وهو ما سيتم تناوله في القسم التالي من الدراسة من خلال تحليل مقاومة النظام البيئي للتغيرات المناخية.

### المبحث الثالث: تحليل متطلبات بناء نموذج مكاني لتقييم مخاطر التصحر

تروم الدراسات الحديثة في مجال تحليل النظم البيئية الانتقال من التحليل الوصفي للتغيرات البيئية إلى بناء نماذج قادرة على تفسير التفاعلات المعقدة بين العوامل البيئية المختلفة لتقييم مخاطر التدهور البيئي عبر دمج مجموعة مؤشرات بيئية ومناخية ضمن إطار تحليلي موحد يوضح التباين المكاني في مستويات الخطورة لاسيما في البيئات الجافة، التي لا يمكن تفسير ظاهرة التصحر فيها بالاعتماد على مؤشر واحد فقط، حيث تتطلب فهما متكاملًا لعناصر عدة، من أبرزها حساسية النظام البيئي للتغيرات المناخية وقدرته على امتصاص الصدمات والتعافي منها (Lambin, Geist, & Lepers, 2005, p. 229)

بناء على ذلك نروم عبر هذا البحث بناء نموذج مكاني لتقييم مخاطر التصحر في قضاء كلار، يستند إلى تحليل مجموعة من المؤشرات البيئية التي تعكس استجابة النظام البيئي للتغيرات المناخية، وتشمل:

١. مقاومة النظام البيئي لصدمة الجفاف
٢. قدرة النظام على التعافي بعد الصدمة
٣. الحساسية المناخية للنظام البيئي
٤. المرونة البيئية المركبة

#### ١. تحليل الصدمة المناخية وقياس مقاومة النظام البيئي (٢٠٠٦-٢٠٠٨):

تعد الصدمات المناخية عامل مهم يؤثر في استقرار النظم البيئية في المناطق الجافة، فهذه النظم غالباً ما تكون حساسة للتغيرات المفاجئة في كميات الأمطار أو درجات الحرارة، وتشير الدراسات البيئية إلى أن قدرة النظام البيئي على مقاومة الصدمة المناخية تمثل أحد المؤشرات الرئيسية على مستوى مرونته البنيوية، فالمقاومة البيئية تعني قدرة النظام على الحفاظ على بنيته الوظيفية عند تعرضه لاضطراب مفاجئ مثل الجفاف أو الانخفاض الحاد في كميات الأمطار، فإذا كان النظام يمتلك مقاومة عالية، فإن التغير في الغطاء النباتي يكون محدوداً رغم حدوث الصدمة المناخية، أما إذا كانت المقاومة ضعيفة فإن النظام سيستجيب بسرعة بانخفاض واضح في النشاط النباتي

(Walker, Holling, Carpenter, & Kinzig, 2007)

وفي البيئات شبه الجافة، يمثل التذبذب المطري أحد أهم مصادر الصدمات البيئية، وقد أظهرت بيانات الأمطار في منطقة البحث وجود تباين واضح بين عامي (٢٠٠٦) و(٢٠٠٨)، حيث سجلت سنة (٢٠٠٦) ظروفاً مطرية أفضل نسبياً مقارنة بسنة (٢٠٠٨) التي شهدت انخفاضاً ملحوظاً في كميات الهطول. ويتيح هذا التباين فرصة مناسبة لدراسة استجابة الغطاء النباتي لصدمة الجفاف ويمكن قياسها وفق المعادلة

$$\text{Drought Shock} = \text{NDVI}_{\text{pre-drought}} - \text{NDVI}_{\text{drought}} \quad \text{الآتية:}$$

NDVI pre-drought: قيمة مؤشر الغطاء النباتي قبل حدوث الجفاف (مثلاً عام ٢٠٠٦)

NDVI drought: قيمة المؤشر خلال سنة الجفاف (مثلاً عام ٢٠٠٨).

وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٦-٧/٥/٢٠٢٦

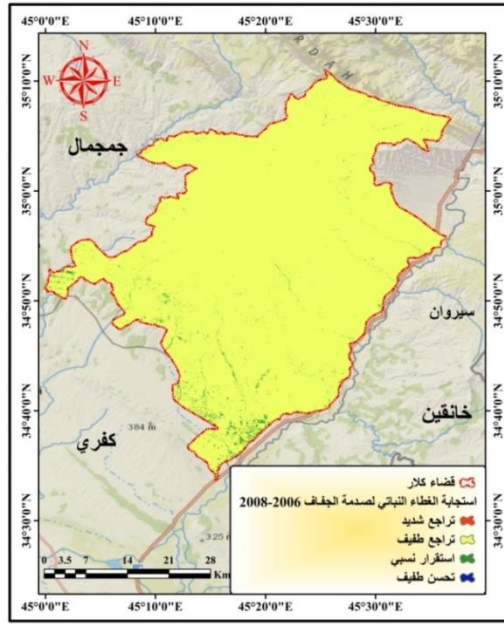
جدول (٥) توزيع مساحة استجابة الغطاء النباتي لصدمة الجفاف (٢٠٠٦-٢٠٠٨)

الفئة	١	٢	٣	٤
الوصف	تراجع شديد	تراجع طفيف	استقرار نسبي	تحسن طفيف
المساحة (كم <sup>2</sup> )	٠,٧٢	١٧٣٢,٣٤	٢٢,٢٣	٠,٠٣

المصدر: بالاعتماد على بيانات الخريطة (٦)

يظهر الجدول (٥) والخريطة (٦) مقاومة النظام البيئي أن استجابة الغطاء النباتي لصدمة الجفاف لم تكن متجانسة مكانيا داخل منطقة البحث، بل تباينت بين قطاعات مختلفة. فقد ظهرت مناطق محدودة شهدت تراجعاً شديداً في النشاط النباتي بلغت مساحتها نحو (٠.٧٢ كم<sup>٢</sup>) وهي مساحة ضئيلة جداً مقارنة بالمساحة الكلية للمنطقة المدروسة، مما يشير إلى أن تأثير الصدمة المناخية الشديدة اقتصر على نطاقات مكانية محدودة نسبياً في المقابل، أظهرت النتائج أن الجزء الأكبر من منطقة البحث وقع ضمن فئة التراجع الطفيف في الغطاء النباتي، حيث بلغت مساحتها نحو (١٧٣٢.٤ كم<sup>٢</sup>) وهو ما يمثل النسبة الغالبة من القضاء ويعكس هذا النمط استجابة بيئية معتدلة لصدمة الجفاف، إذ إن الانخفاض في النشاط النباتي كان محدوداً نسبياً ولم يصل إلى مستوى التدهور الحاد. كما أظهرت الخريطة وجود مناطق حافظت على استقرار نسبي في الغطاء النباتي بلغت مساحتها نحو (٢٢.٢٣ كم<sup>٢</sup>) وهي مناطق يبدو أن النظام البيئي فيها تمكن من الحفاظ على توازنه رغم التراجع المطري خلال سنة الجفاف. وقد يعزى ذلك إلى عوامل بيئية موضعية، مثل خصائص التربة، والتباين التضاريسي، أو وجود رطوبة مخزونة في التربة ساعدت النباتات على الاستمرار في النمو، أما المناطق التي شهدت تحسناً طفيفاً في الغطاء النباتي فقد كانت محدودة جداً، إذ لم تتجاوز مساحتها نحو (٠.٠٣ كم<sup>٢</sup>)، وهو تحسن طفيف قد يرتبط بتفاوت التوزيع المكاني للأمطار أو بتأثيرات محلية في توفر المياه وبصورة عامة، وتشير هذه النتائج إلى أن صدمة الجفاف التي حدثت عام (٢٠٠٨) أدت إلى تراجع في النشاط النباتي في أجزاء واسعة من منطقة البحث، إلا أن هذا التراجع اتخذ في الغالب طابعاً طفيفاً ولم يتحول إلى تدهور واسع النطاق. ويعكس ذلك وجود درجة معينة من المقاومة البيئية لدى النظام البيئي في قضاء كلار، حيث استطاع امتصاص أثر الصدمة المناخية دون أن يتعرض لانهايار شامل في الغطاء النباتي غير أن تقييم مرونة النظام البيئي لا يكتمل بتحليل المقاومة البيئية وحدها، إذ إن العنصر الأهم في مفهوم المرونة يتمثل في قدرة النظام على استعادة توازنه بعد الصدمة المناخية. ومن هنا تبرز أهمية الانتقال إلى تحليل مرحلة التعافي البيئي خلال الفترة (٢٠٠٨-٢٠١٨)، والتي تسمح بتقييم مدى قدرة النظام البيئي على استعادة نشاطه الحيوي بعد عقد من الزمن من حدوث صدمة الجفاف.

خريطة (٦) استجابة الغطاء النباتي لصدمة الجفاف (٢٠٠٦-٢٠٠٨)



المصدر: بالاعتماد على تحليل معطيات المرئية الفضائية لمنطقة البحث (٢٠٠٠ - ٢٠٢٥) وبدقة ٣٠ م

٢. التغير وتحليل المقاومة والتعافي: تظهر خرائط الفروق الزمنية التغيرات التي طرأت على النشاط النباتي خلال فترات زمنية مختلفة لبيان إذا ما كان الغطاء النباتي قد شهد تحسناً أو تراجعاً خلال تلك الفترة. غير أن هذا النوع من التحليل يظل وصفيًا في طبيعته، لأنه يوضح التغير الذي حدث دون أن يفسر بصورة دقيقة كيفية استجابة النظام البيئي لصدمة المناخية أو قدرته على التكيف معها ولذلك فإن تحليل استجابة النظام البيئي لهذه الصدمات يتطلب دراسة عنصرين أساسيين هما المقاومة البيئية والقدرة على التعافي بينما تعتبر المقاومة البيئية عن قدرة النظام البيئي على الحفاظ على نشاطه الحيوي عند التعرض لاضطراب مناخي مفاجئ، في حين يشير التعافي البيئي إلى قدرة النظام على استعادة توازنه بعد انتهاء الصدمة المناخية. ويعد تحليل هذين المؤشرين خطوة أساسية لفهم مرونة النظام البيئي في مواجهة التغيرات المناخية (Holling, 1973, p. 19)، لذلك، سننتقل الآن إلى تحليل مقاومة النظام البيئي لصدمة الجفاف التي حدثت بين عامي (٢٠٠٦-٢٠٠٨)، وذلك بهدف تقييم مدى قدرة الغطاء النباتي في قضاء كلار على تحمل التغيرات المناخية المفاجئة، قبل الانتقال لاحقاً إلى تحليل مرحلة التعافي البيئي خلال الفترة (٢٠٠٨-٢٠١٨) ويمكن استخراجها عبر المعادلة:

$$\text{Resistance} = \text{NDVI}_{\text{pre-drought}} / \text{NDVI}_{\text{drought}}$$

NDVI pre-drought = قيمة مؤشر الغطاء النباتي خلال سنة الجفاف (مثلاً ٢٠٠٨).

NDVI drought = قيمة المؤشر قبل الجفاف (مثلاً ٢٠٠٦).

أ. مقاومة النظام البيئي لصدمة الجفاف (٢٠٠٦-٢٠٠٨): تظهر خريطة (٧) والجدول (٦) مقاومة النظام البيئي وجود تباين مكاني واضح في استجابة الغطاء النباتي لصدمة الجفاف التي شهدتها المنطقة بين عامي (٢٠٠٦-٢٠٠٨). فقد تركزت المساحة الأكبر ضمن فئة المقاومة المتوسطة، حيث بلغت مساحتها (١٧٣٢.٣٣ كم<sup>٢</sup>)، وهو ما يمثل الجزء الأكبر من مساحة منطقة البحث. ويشير هذا النمط إلى أن الغطاء النباتي في قضاء كلار يمتلك قدرة نسبية على تحمل الصدمات المناخية دون حدوث انهيار واسع في النشاط النباتي.

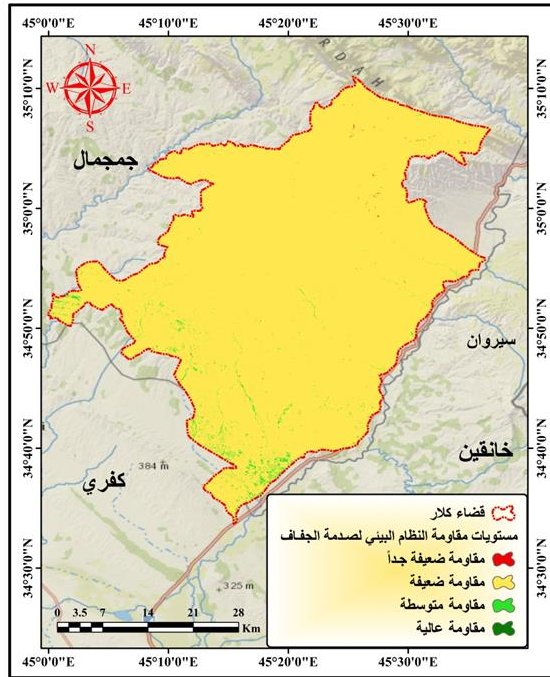
جدول (٦) مستويات مقاومة النظام البيئي لصدمة الجفاف في قضاء كلار

الفئة	١	٢	٣	٤
مستوى المقاومة	مقاومة منخفضة	مقاومة متوسطة	مقاومة مرتفعة	مقاومة مرتفعة جداً
المساحة (كم <sup>٢</sup> )	٠,٧٢	١٧٣٢,٣٣	٢٢,٢٣	٠,٠٣

المصدر: بالاعتماد على الخريطة (٧)

في المقابل، ظهرت مساحات محدودة ضمن فئة المقاومة المرتفعة بلغت (٢٢.٢ كم<sup>٢</sup>) وهي مناطق يبدو أن الغطاء النباتي فيها يمتلك قدرة أكبر على التكيف مع ظروف الجفاف، وقد يرتبط ذلك بعوامل بيئية موضعية مثل خصائص التربة أو التباين الطبوغرافي الذي يسهم في الاحتفاظ بالرطوبة. أما فئة المقاومة المرتفعة جداً فقد كانت محدودة للغاية، إذ لم تتجاوز مساحتها (٠.٠٣ كم<sup>٢</sup>) مما يشير إلى أن المناطق التي تمتلك قدرة عالية على مقاومة الجفاف تقتصر على نطاقات مكانية صغيرة داخل القضاء

الخريطة (٧) مقاومة النظام البيئي لصدمة الجفاف في قضاء كلار



المصدر: بالاعتماد على تحليل معطيات المرئية الفضائية لمنطقة البحث (٢٠٠٠-٢٠٢٥) وبدقة ٣٠ م

## وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٦-٧/٥/٢٠٢٦

وظهرت مناطق محدودة أيضا ضمن فئة المقاومة المنخفضة بلغت (٠.٧٢ كم<sup>٢</sup>) وهي مناطق يبدو فيها الغطاء النباتي أكثر حساسية للتغيرات المناخية، مما يجعلها عرضة للتدهور عند حدوث صدمات بيئية، وتؤكد هذه النتائج أن النظام البيئي في كلار يمتلك قدرة معقولة على مقاومة الصدمات المناخية قصيرة الأمد، غير أن تقييم مرونة النظام البيئي لا يكتمل بتحليل المقاومة وحدها، لأن العنصر الأهم في مفهوم المرونة يتمثل في قدرة النظام على استعادة توازنه بعد انتهاء الصدمة المناخية.

ب. تحليل التعافي البيئي للنظام بعد الصدمة (٢٠٠٨-٢٠١٨): يمثل تحليل التعافي البيئي الخطوة الأساسية التالية لفهم مدى قدرة النظام البيئي في منطقة البحث على استعادة نشاطه الحيوي بعد صدمة الجفاف التي حدثت عام (٢٠٠٨)، وهو ما يشكل أحد المكونات الرئيسية في بناء مؤشر المرونة البيئية الذي يعتمد عليه نموذج مخاطر التصحر ويمكن استخراجها عبر المعادلة التالية:

$$\text{Recovery} = \text{NDVI}_{\text{drought}} / \text{NDVI}_{\text{post-drought}}$$

حيث ان

NDVI<sub>post-drought</sub>: قيمة مؤشر الغطاء النباتي بعد انتهاء الجفاف (مثلاً ٢٠١٨)  
NDVI<sub>drought</sub>: قيمة المؤشر خلال سنة الجفاف (مثلاً ٢٠٠٨).

حيث يمثل التعافي البيئي أحد الأبعاد الأساسية لمفهوم مرونة النظم البيئية، إذ يعكس قدرة النظام على استعادة نشاطه الحيوي بعد تعرضه لاضطراب بيئي أو صدمة مناخية، فمرونة النظام لا تقاس فقط بمدى قدرته على مقاومة الصدمة، بل بقدرته أيضا على العودة إلى حالة التوازن أو الاقتراب منها بعد انتهاء الاضطراب وفي البيئات شبه الجافة، يعد التعافي النباتي مؤشرا مهما على سلامة النظام البيئي، لأن الغطاء النباتي يمثل العنصر الأكثر حساسية للتغيرات المناخية، خاصة تلك المرتبطة بالتذبذب المطري فبعد حدوث صدمة جفاف، قد يستعيد الغطاء النباتي نشاطه خلال السنوات اللاحقة إذا توفرت الظروف المناخية المناسبة، مما يعكس وجود مرونة بيئية وقدرة على التكيف مع التغيرات المناخية ومن هذا المنطلق، فإن تحليل التعافي البيئي يسمح بتقييم قدرة النظام البيئي على استعادة إنتاجيته النباتية بعد صدمة الجفاف التي شهدتها المنطقة عام (٢٠٠٨) (Walker et al., 2004, p. 8).

جدول (٧) توزيع مساحة مستويات التعافي البيئي بعد صدمة الجفاف (٢٠٠٨-٢٠١٨)

الفئة	١	٢	٣	٤
الوصف	ضعيف جداً	ضعيف	متوسط	مرتفع
المساحة (كم <sup>٢</sup> )	٠,٨٢	١,٥٧	١٧٤٠,٤	١٢,٤

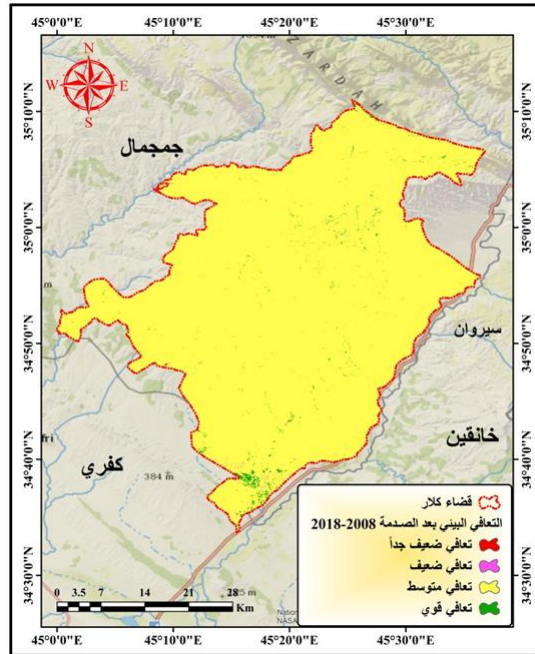
المصدر: بالاعتماد على بيانات الخريطة (٦)

يوضح الجدول (٧) وخريطة التعافي البيئي (٦) أن النظام البيئي في كلار أظهر قدرة واضحة على استعادة نشاطه الحيوي بعد صدمة الجفاف التي حدثت عام (٢٠٠٨). فقد أظهرت النتائج أن الجزء الأكبر من

## وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٦-٧/٥/٢٠٢٦

منطقة البحث وقع ضمن فئة التعافي المتوسط، حيث بلغت مساحتها نحو (١٧٤٠.٤ كم<sup>٢</sup>) وهو ما يمثل الغالبية العظمى من مساحة المنطقة المدروسة. ويعكس هذا النمط قدرة النظام البيئي على استعادة جزء كبير من نشاطه النباتي خلال العقد اللاحق للصدمة المناخية، كما أظهرت النتائج وجود مناطق شهدت تعافياً مرتفعاً في الغطاء النباتي بلغت مساحتها نحو (١٢.٤٣ كم<sup>٢</sup>) وهي مناطق يبدو أن الظروف البيئية فيها كانت أكثر ملاءمة لاستعادة النشاط النباتي، ربما نتيجة توفر رطوبة التربة أو ملاءمة الخصائص الطبوغرافية في المقابل، ظهرت مساحات محدودة ضمن فئتي التعافي الضعيف والتعافي الضعيف جداً، حيث بلغت مساحتهما نحو (٠.٨٢ كم<sup>٢</sup>) وتشير هذه المساحات الصغيرة إلى وجود نطاقات موضعية لم تتمكن من استعادة نشاطها النباتي بالكامل بعد صدمة الجفاف.

الخريطة (٦) مستويات التعافي البيئي بعد صدمة الجفاف (٢٠٠٨-٢٠١٨).



المصدر: بالاعتماد على تحليل معطيات المرئية الفضائية لمنطقة البحث (٢٠٠٠-٢٠٢٥) وبدقة ٣٠ م تشير هذه النتائج إلى أن النظام البيئي في قضاء كلار يمتلك قدرة ملحوظة على التعافي البيئي بعد الاضطرابات المناخية، حيث تمكنت معظم المساحة من استعادة نشاطها النباتي خلال فترة زمنية لاحقة لصدمة الجفاف مما يعكس وجود درجة من المرونة البيئية تسمح للنظام البيئي بالتكيف مع التذبذب المناخي غير أن فهم مرونة النظام البيئي بصورة أكثر شمولاً يتطلب تحليل درجة الحساسية المناخية للنظام البيئي عبر الزمن، وهو ما سيتم تناوله في القسم التالي من الدراسة.

ت. تحليل الحساسية المناخية للنظام البيئي: تعني الحساسية درجة استجابة النظام البيئي للتغيرات في الظروف المناخية، لاسيما التذبذب في الأمطار والحرارة فكلما ارتفعت حساسية النظام البيئي، زادت سرعة

## وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٦-٧/٥/٢٠٢٦

استجابته للتغيرات المناخية، وهو ما قد يؤدي إلى تذبذب واضح في النشاط النباتي (Walker, Holling, Carpenter, & Kinzig, 2007) وفي البيئات شبه الجافة، تعد الحساسية المناخية سمة مميزة للنظم البيئية، حيث يعتمد النشاط النباتي كثيرا على توفر المياه الناتجة عن الهطول المطري. لذا فإن أي تغير في كمية الأمطار أو توزيعها الزمني قد ينعكس مباشرة على كثافة الغطاء النباتي وإنتاجيته (Reynolds, 2007 p 847, p. 850) ومن هذا المنطلق، فإن تحليل الحساسية المناخية يوفر مؤشرا مهما لفهم استقرار النظام البيئي أو قابليته للتقلبات البيئية. ويمكن استخراجها عبر المعادلة التالية:

$$\text{Sensitivity} = \Delta \text{NDVI} / \Delta P$$

$$\Delta \text{NDVI} = \text{مقدار التغير في مؤشر الغطاء النباتي بين فترتين زمنيتين}$$

$$\Delta P = \text{مقدار التغير في كمية الأمطار خلال نفس الفترة}$$

فالمناطق ذات الحساسية المرتفعة غالبا ما تكون أكثر عرضة للتدهور البيئي عند حدوث صدمات مناخية، في حين تميل المناطق ذات الحساسية المنخفضة إلى الحفاظ على استقرارها النسبي رغم التذبذب المناخي وفي هذا البحث، تم قياس الحساسية المناخية للنظام البيئي من خلال تحليل التذبذب الزمني في مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) عبر سلسلة زمنية طويلة، ثم إعادة تصنيف النتائج إلى أربع فئات تمثل مستويات مختلفة من الحساسية البيئية.

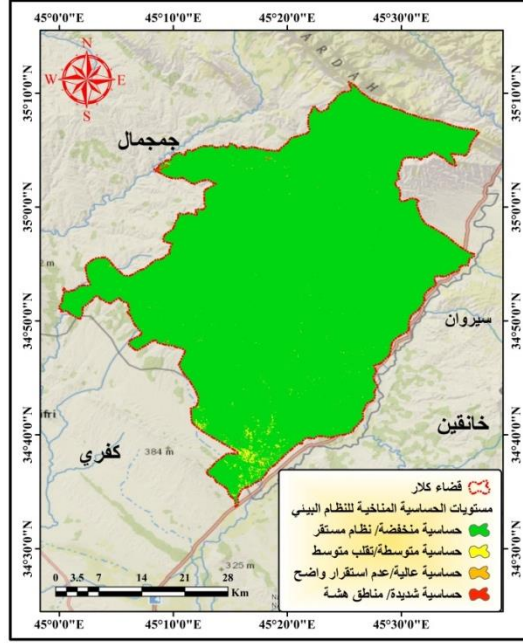
جدول (٨) توزيع مستويات الحساسية المناخية للنظام البيئي في قضاء كلار

الفئة	١	٢	٣	٤
الوصف	حساسية منخفضة / نظام مستقر	حساسية متوسطة / استقرار متوسط	حساسية عالية / عدم استقرار واضح	حساسية شديدة / مناطق هشّة
المساحة (كم <sup>٢</sup> )	١٧٤١,٤	١٢,٦٤	٠,٢٧	٠,٩٩

المصدر: بالاعتماد على الخريطة (٧)

يظهر الجدول (٨) والخريطة (٧) الحساسية المناخية للنظام البيئي أن غالبية مساحة قضاء كلار تقع ضمن فئة الحساسية المناخية المنخفضة، حيث بلغت مساحتها (١٧٤١.٤ كم<sup>٢</sup>)، وهو ما يمثل النسبة الأكبر من مساحة منطقة البحث. وتشير هذه النتيجة إلى أن معظم أجزاء النظام البيئي تتمتع بدرجة عالية من الاستقرار النسبي في استجابتها للتذبذب المناخي، في المقابل، ظهرت مساحات محدودة ضمن فئة الحساسية المتوسطة بلغت (١٢.٦ كم<sup>٢</sup>) وهي مناطق يبدو أن الغطاء النباتي فيها يتأثر بدرجة أكبر بالتغيرات في الظروف المناخية، خاصة تلك المرتبطة بالتذبذب المطري السنوي.

خريطة (٧) مستويات الحساسية المناخية للنظام البيئي في قضاء كلار



المصدر: بالاعتماد على تحليل معطيات المرئية الفضائية لمنطقة البحث (٢٠٠٠-٢٠٢٥) وبدقة ٣٠ م  
أما المناطق التي أظهرت حساسية عالية فقد كانت محدودة للغاية، إذ لم تتجاوز مساحتها (٠.٢٧ كم<sup>٢</sup>)،  
في حين بلغت مساحة المناطق ذات الحساسية الشديدة أو الهشة بيئياً (٠.٩٩ كم<sup>٢</sup>) وتشير هذه النتائج إلى  
أن النطاقات الأكثر عرضة للتقلبات المناخية تتركز في مناطق صغيرة نسبياً داخل منطقة البحث. وبصورة  
عامة، تعكس هذه النتائج أن النظام البيئي في قضاء كلار يتمتع بدرجة ملحوظة من الاستقرار البيئي في  
مواجهة التذبذب المناخي، حيث تتركز الحساسية المرتفعة في نطاقات مكانية محدودة. غير أن هذه المناطق  
الهشة قد تمثل بؤراً محتملة لتدهور الغطاء النباتي في حال تعرضها لصدمات مناخية متكررة ومن هنا تأتي  
أهمية دمج نتائج الحساسية المناخية مع مؤشرات المقاومة والتعافي البيئي بهدف بناء مؤشر مركب لمرونة  
النظام البيئي، وهو ما سيتم تناوله في القسم التالي من الدراسة من خلال تحليل مؤشر المرونة المركبة.  
ث. تحليل المرونة البيئية المركبة للنظام البيئي: تعد المرونة البيئية من المفاهيم الأساسية في علم البيئة  
الحديثة، إذ تعكس قدرة النظام البيئي على امتصاص الاضطرابات البيئية والتكيف معها دون أن يفقد بنيته  
الوظيفية أو ينتقل إلى حالة تدهور دائم. وقد قدم (Holling) أول تعريف علمي لهذا المفهوم، حيث أشار  
إلى أن المرونة تمثل قدرة النظام البيئي على تحمل الصدمات وإعادة تنظيم نفسه مع الحفاظ على خصائصه  
الأساسية وفي السياق التطبيقي، لا تقاس المرونة البيئية بمؤشر واحد، بل تعتمد على مجموعة من الأبعاد  
المتكاملة التي تعكس سلوك النظام البيئي عند التعرض للاضطرابات. ويشير (Walker) إلى أن تقييم  
المرونة البيئية يتطلب تحليل ثلاثة عناصر رئيسية، هي: المقاومة (Resistance) التي تعبر عن قدرة

## وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٦-٧/٥/٢٠٢٦

النظام على تحمل الصدمة، والتعافي (Recovery) الذي يعكس قدرته على استعادة نشاطه الحيوي بعد الاضطراب، إضافة إلى قابلية التكيف مع التغيرات البيئية طويلة الأمد (Walker, Holling, Carpenter, & Kinzig, 2007) وفي البيئات شبه الجافة، تكتسب دراسة المرونة البيئية أهمية خاصة، لأن هذه النظم تتعرض بصورة متكررة لتذبذبات مناخية حادة، ولا سيما تلك المرتبطة بالجفاف. فبعض النظم البيئية قد تمتلك قدرة عالية على مقاومة الصدمة المناخية، في حين تعتمد نظم أخرى على سرعة التعافي بعد انتهاء الاضطراب. ومن هنا تظهر أهمية دمج مؤشري المقاومة والتعافي في مؤشر مركب يسمح بفهم قدرة النظام البيئي على الاستجابة الشاملة للتغيرات المناخية (Folke, Carpenter, Walker, Scheffer, Chapin III, & Rockström, 2004, p. 16) (مع نتائج تحليل التعافي البيئي خلال الفترة (٢٠٠٦-٢٠٠٨)، بهدف بناء مؤشر مركب للمرونة البيئية يعكس القدرة الكلية للنظام البيئي في قضاء كلار على مواجهة التغيرات المناخية وفقا للمعادلة التالية:

$$\text{Resilience} = \text{Resistance} \times \text{Recovery} \quad \text{حيث ان}$$

**Resistance:** مقاومة النظام البيئي لصدمة الجفاف

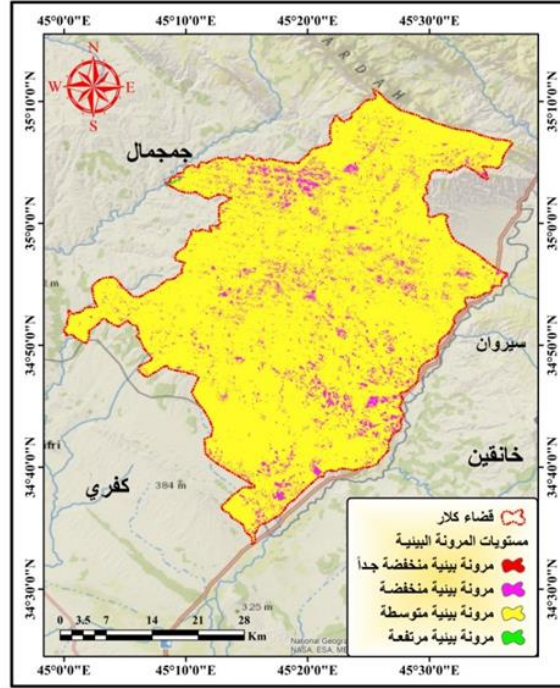
**Recovery:** قدرة النظام البيئي على التعافي بعد الجفاف

جدول (٩) توزيع مستويات المرونة البيئية في قضاء كلار

الفئة	١	٢	٣	٤
الوصف	مرونة منخفضة جداً (مناطق هشة)	مرونة منخفضة	مرونة متوسطة	مرونة مرتفعة
المساحة (كم <sup>٢</sup> )	٠.١٥	١٢٨.٩٤	١٦٢٥.٣	٠.٩٠

المصدر: بالاعتماد على الخريطة (٨)

الخريطة (٨) مستويات المرونة البيئية في قضاء كلار



المصدر: بالاعتماد على تحليل معطيات المرئية الفضائية لمنطقة البحث (٢٠٠٠ - ٢٠٢٥) وبدقة ٣٠ م

يظهر الجدول (٨) والخريطة (٨) المرونة البيئية المركبة أن النظام البيئي في قضاء كلار يتمتع بدرجة ملحوظة من المرونة البيئية المتوسطة، حيث تركزت الغالبية العظمى من مساحة منطقة البحث ضمن هذه الفئة، إذ بلغت مساحتها (٢١٦٢٥.٣ كم<sup>٢</sup>) وتشير هذه النتيجة إلى أن معظم أجزاء المنطقة تمتلك قدرة معقولة على مقاومة الصدمات المناخية واستعادة نشاطها النباتي لاحقاً، في المقابل، ظهرت مناطق محدودة ضمن فئة المرونة المنخفضة بلغت مساحتها (٢١٢٨.٩ كم<sup>٢</sup>) وهي مناطق يبدو أن قدرتها على مقاومة الاضطرابات المناخية أو التعافي منها أقل نسبياً مقارنة ببقية أجزاء المنطقة. وقد يعزى ذلك إلى اختلاف الخصائص البيئية المحلية مثل نوع التربة أو الظروف الطبوغرافية أو محدودية الموارد المائية أما المناطق التي أظهرت مرونة مرتفعة فقد كانت محدودة نسبياً، إذ لم تتجاوز مساحتها (٠.٩٠ كم<sup>٢</sup>) وهي مناطق يبدو أن النظام البيئي فيها يمتلك قدرة عالية على التكيف مع التغيرات المناخية واستعادة نشاطه الحيوي بسرعة نسبية، كما أظهرت النتائج وجود مساحات صغيرة جداً ضمن فئة المرونة المنخفضة جداً أو المناطق الهشة بيئياً بلغت (٠.١٥ كم<sup>٢</sup>) ، وهو ما يشير إلى أن المناطق الأكثر عرضة للتدهور البيئي الشديد محدودة للغاية داخل منطقة البحث، وبصورة عامة، تعكس هذه النتائج أن النظام البيئي في قضاء كلار يمتلك مرونة بيئية متوسطة إلى جيدة، حيث تمكنت معظم المساحة المدروسة من الحفاظ على قدر من الاستقرار البيئي رغم التذبذب المناخي الذي شهدته المنطقة خلال السنوات الماضية. غير أن تقييم مخاطر التصحر بصورة أدق يتطلب دمج نتائج المرونة البيئية مع مؤشرات أخرى، ولا سيما الحساسية المناخية، بهدف تحديد المناطق

التي قد تتحول إلى بؤر محتملة للتدهور البيئي في المستقبل. ومن هنا تأتي أهمية بناء نموذج مكاني مركب لمخاطر التصحر يجمع بين مؤشرات المرونة والحساسية المناخية.

### سادسا: بناء نموذج مخاطر التصحر

يمثل تقييم مخاطر التصحر أحد التحديات الرئيسية في الدراسات البيئية المعاصرة، نظرا للطبيعة المعقدة والمتعددة الأبعاد لهذه الظاهرة. فالتصحر لا ينتج عن عامل واحد، بل هو نتيجة تفاعل مجموعة من العوامل البيئية والمناخية التي تؤثر في استقرار النظم البيئية وإنتاجيتها الحيوية. ولذلك تؤكد الأدبيات الحديثة أن فهم مخاطر التصحر يتطلب تبني نماذج تحليلية تجمع بين عدة مؤشرات بيئية بدلا من الاعتماد على مؤشر منفرد لذا فإن بناء النماذج المكانية أحد الأساليب الحديثة لتحليل التدهور البيئي، إذ يسمح بدمج مجموعة من المؤشرات البيئية والمناخية ضمن إطار تحليلي موحد يساعد على تحديد المناطق الأكثر عرضة للتدهور أو التصحر. وتشير الدراسات الحديثة إلى أن تقييم مخاطر التصحر يتطلب الجمع بين مؤشرات متعددة تعكس استجابة النظام البيئي للضغوط المناخية والبيئية. وفي البيئات الجافة وشبه الجافة، يعد التفاعل بين الحساسية المناخية للنظام البيئي ودرجة المرونة البيئية من أهم العوامل التي تحدد قابلية النظام البيئي للتدهور. فالمناطق التي تتميز بحساسية مناخية مرتفعة ومرونة منخفضة تكون أكثر عرضة لمخاطر التصحر مقارنة بالمناطق التي تتمتع بدرجة مرتفعة من الاستقرار (Reynolds, 2007 p 847, (p. 851). ومن هذا المنطلق، اعتمد هذا البحث على بناء نموذج مكاني لمخاطر التصحر يعتمد على دمج مؤشرين رئيسيين هما:

١. الحساسية المناخية للنظام البيئي ٢. المرونة البيئية المركبة وذلك وفق العلاقة الرياضية الآتية:

$$DR = \text{Variability} / \text{Resilience}$$

حيث إن:

$$DR = \text{مخاطر التصحر (Desertification Risk)} = S \text{ الحساسية المناخية (Sensitivity / Variability) اما}$$
$$R = \text{المرونة البيئية (Resilience)}$$

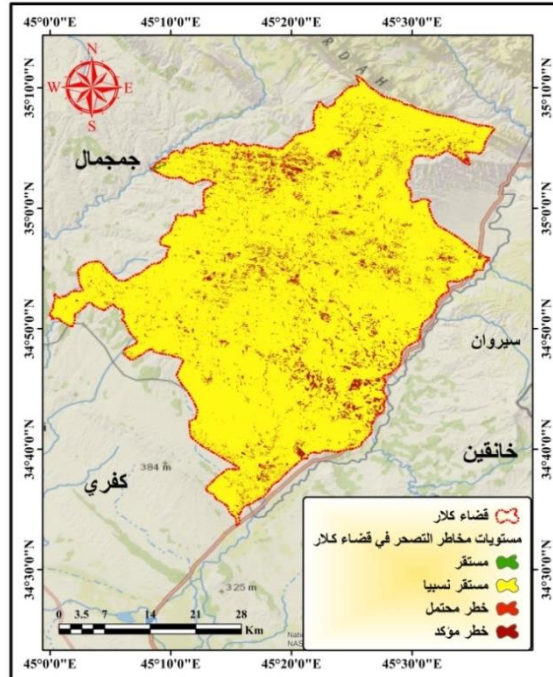
فالحساسية المناخية تمثل درجة استجابة النظام البيئي للتغيرات المناخية، وتعكس المرونة البيئية قدرة النظام على مقاومة الصدمات المناخية والتعافي منها، بالتالي فإن المناطق التي تجمع بين حساسية مرتفعة ومرونة منخفضة تصبح الأكثر عرضة لمخاطر التدهور البيئي وقد تم تنفيذ عملية الدمج المكاني بين هذين المؤشرين باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، مما أدى إلى إنتاج خريطة نموذج مخاطر التصحر والتي توضح التوزيع المكاني لمستويات مخاطر التصحر في منطقة البحث.

جدول (١٠) مستويات مخاطر التصحر في قضاء كلار

الفئة	١	٢	٣	٤
مستوى الخطر	استقرار بيئي مرتفع	مستقر نسبياً	خطر محتمل	خطر مؤكد
المساحة (كم <sup>٢</sup> )	٠,٩٢	١٦٣٠,٣	١٩٦,٣٢	٠,١٣

المصدر: بالاعتماد على بيانات الخريطة (٩)

الخريطة (٩) مستويات مخاطر التصحر في قضاء كلار



المصدر: بالاعتماد على تحليل معطيات المرئية الفضائية لمنطقة البحث (٢٠٢٥ - ٢٠٠٠) وبدقة ٣٠ م تظهر خريطة نموذج مخاطر التصحر أن غالبية مساحة قضاء كلار تقع ضمن فئة الخطر المنخفض للتصحر، حيث بلغت مساحتها (١٦٣٠,٣ كم<sup>٢</sup>) وهو ما يمثل الجزء الأكبر من منطقة البحث. وتشير هذه النتيجة إلى أن النظام البيئي في المنطقة يتمتع بدرجة جيدة من الاستقرار البيئي، ويرتبط ذلك بوجود مرونة بيئية متوسطة وانخفاض مستوى الحساسية المناخية في معظم أجزاء المنطقة في المقابل، ظهرت مساحات محدودة ضمن فئة الخطر المتوسط للتصحر بلغت (١٢٣,٩٦ كم<sup>٢</sup>) وهي مناطق قد تكون أكثر عرضة للتأثر بالتغيرات المناخية نتيجة ارتفاع مستوى الحساسية أو انخفاض القدرة على التعافي أما المناطق التي ظهرت ضمن فئة الخطر المرتفع للتصحر فقد كانت محدودة للغاية، إذ لم تتجاوز مساحتها (٠,١٣ كم<sup>٢</sup>)، وهو ما يشير إلى أن المناطق الأكثر هشاشة بيئياً داخل منطقة البحث تتركز في نطاقات مكانية صغيرة جداً كما ظهرت مساحات محدودة ضمن فئة الاستقرار البيئي المرتفع بلغت (٠,٩٢ كم<sup>٢</sup>) وهي مناطق يبدو أن النظام البيئي فيها يتمتع بقدرة عالية على مقاومة التغيرات المناخية والحفاظ على نشاطه الحيوي وبصورة

عامة، تعكس هذه النتائج أن مخاطر التصحر في قضاء كلار ليست واسعة النطاق، بل تتركز في مناطق محدودة نسبياً، في حين تتمتع غالبية المنطقة بدرجة جيدة من الاستقرار البيئي.

#### سابعاً: التحقق من نموذج مخاطر التصحر

يعد التحقق من النماذج المكانية خطوة أساسية في الدراسات البيئية، إذ يهدف إلى تقييم مدى قدرة النموذج المقترح على تفسير التغيرات الفعلية التي تحدث في النظام البيئي. فالنموذج التحليلي لا يكتسب قيمته العلمية إلا إذا أظهر درجة مقبولة من التوافق مع البيانات الواقعية أو التغيرات البيئية التي تحدث لاحقاً. (Pontius Jr. & Schneider, p. 241) وفي دراسات التصحر والتدهور البيئي، يتم اختبار النماذج المكانية غالباً من خلال مقارنة نتائجها مع التغيرات الفعلية التي طرأت على الغطاء النباتي خلال فترة زمنية لاحقة، إذ يسمح هذا الأسلوب بتقييم مدى دقة النموذج في تحديد المناطق الأكثر عرضة للتدهور البيئي لذلك، قمنا بإجراء اختبار زمني لنموذج مخاطر التصحر من خلال مقارنة نتائجه مع التغير الفعلي في الغطاء النباتي خلال الفترة (٢٠١٨، ٢٠٢١) وتم حساب الفرق بين قيم مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) للسنتين المذكورتين بغية تحديد المناطق التي شهدت تراجعاً أو تحسناً في النشاط النباتي خلال هذه الفترة وقد نتج عن هذا التحليل خريطة التحقق التي توضح مدى توافق نتائج نموذج مخاطر التصحر مع التغيرات الفعلية التي شهدتها الغطاء النباتي في منطقة البحث.

جدول (١١) التحقق من نموذج مخاطر التصحر باستخدام التغير الفعلي للغطاء النباتي (٢٠١٨-٢٠٢١)

الفئة	١	٢	٣	٤
مستوى التغير	تراجع واضح في الغطاء النباتي	تراجع طفيف	تحسن طفيف	تحسن واضح
المساحة (كم <sup>٢</sup> )	٠.٦٥	١٠٥.٤٢	١٦٤٣.١	٧.٦١

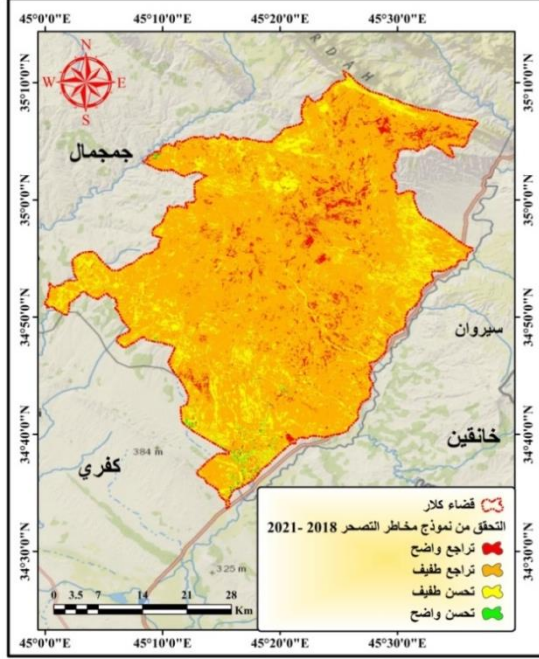
المصدر: بالاعتماد على بيانات الخريطة (١٠)

يظهر الجدول (١١) والخريطة (١٠) التحقق من نموذج مخاطر التصحر وجود تباين مكاني في التغيرات التي شهدتها الغطاء النباتي في قضاء كلار خلال الفترة الممتدة بين عامي (٢٠١٨-٢٠٢١). فقد تركزت المساحة الأكبر ضمن فئة التحسن الطفيف في الغطاء النباتي، حيث بلغت مساحتها (١٦٤٣.١ كم<sup>٢</sup>)، وهو ما يشير إلى أن معظم أجزاء منطقة البحث شهدت استقراراً نسبياً أو تحسناً محدوداً في النشاط النباتي خلال هذه الفترة، في المقابل، ظهرت مساحات محدودة ضمن فئة التراجع الطفيف في الغطاء النباتي بلغت (١٠٥.٤٢ كم<sup>٢</sup>)، وهي مناطق قد تكون أكثر تأثراً بالتذبذب المناخي أو العوامل البيئية المحلية، أما فئة التراجع الواضح في الغطاء النباتي فقد كانت محدودة للغاية، إذ لم تتجاوز مساحتها (٠.٦٥ كم<sup>٢</sup>) مما يشير إلى أن التدهور النباتي الشديد خلال هذه الفترة يقتصر على نطاقات مكانية صغيرة داخل منطقة البحث.

## وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٦-٧/٥/٢٠٢٦

كما ظهرت مساحات محدودة ضمن فئة التحسن الواضح بلغت (٧.٦١ كم<sup>٢</sup>)، وهي مناطق يبدو أن الظروف البيئية فيها كانت أكثر ملاءمة للنمو النباتي خلال هذه الفترة وتشير هذه النتائج إلى وجود درجة جيدة من التوافق بين نتائج نموذج مخاطر التصحر والتغيرات الفعلية التي شهدتها الغطاء النباتي في منطقة البحث، إذ إن المناطق التي حددها النموذج كمناطق ذات خطر منخفض أو متوسط أظهرت في معظمها استقرارا نسبيا في النشاط النباتي خلال الفترة اللاحقة.

خريطة (١٠) مخاطر التصحر باستخدام التغير الفعلي في الغطاء النباتي (٢٠١٨-٢٠٢١)



المصدر: بالاعتماد على تحليل معطيات المرئية الفضائية لمنطقة البحث (٢٠٢٥ - ٢٠٢٠) وبدقة ٣٠ م

ثامنا: المناقشة العلمية في إطار الأدبيات العلمية المتعلقة بدراسات التصحر والتغير البيئي

إن تحليل الاتجاهات الزمنية للغطاء النباتي، ودراسة استجابة النظام البيئي لصدمة الجفاف، وتقييم الحساسية المناخية والمرونة البيئية، وصولاً إلى بناء نموذج مخاطر التصحر والتحقق من نتائجه، يوفر إطاراً تحليلياً متكاملاً لفهم ديناميكيات النظام البيئي في قضاء كلار، وقد أظهرت نتائج الدراسة أن النظام البيئي في منطقة البحث يتمتع بدرجة ملحوظة من الاستقرار النسبي، مع وجود تباين مكاني في مستويات الحساسية والمرونة البيئية. وتؤكد هذه النتائج أهمية استخدام النماذج المكانية في تحليل التدهور البيئي، إذ تسمح بتحديد المناطق الأكثر عرضة لمخاطر التصحر وتوجيه الجهود البيئية نحوه وفي ضوء هذه النتائج، تنتقل الدراسة في القسم التالي إلى مناقشة النتائج في إطار الأدبيات العلمية المتعلقة بدراسات التصحر والتغير البيئي في المناطق الجافة وشبه الجافة. يظهر الجدول (١٢) والخريطة (١١) التوزيع المكاني لمستويات

## وقائع المؤتمر الدولي الرابع (التعليم العالي وقضايا المجتمع المعاصر) ٦-٧/٥/٢٠٢٦

الاستقرار والهشاشة البيئية في قضاء كلار، حيث تعكس ناتج دمج مؤشري الحساسية المناخية والمرونة البيئية ضمن إطار مكاني متكامل .

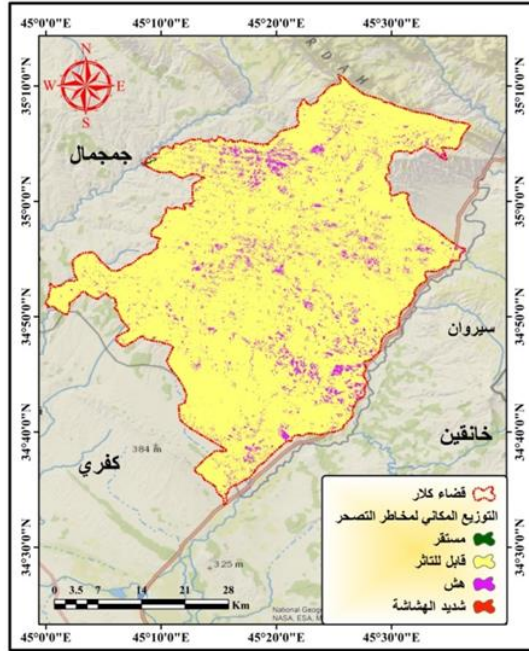
جدول (١٢) التوزيع المكاني لمستويات الاستقرار والهشاشة البيئية في قضاء كلار

الفئة	١	٢	٣	٤
الوصف	مستقر	قليل التأثير	هش	شديد الهشاشة
المساحة (كم <sup>٢</sup> )	٠,٩٢	١٦٣٠,٣	١٢٣,٩	٠,١٣

المصدر: بالاعتماد على بيانات الخريطة (١١)

وتشير النتائج إلى أن المساحة الأكبر من منطقة البحث تقع ضمن فئة قليل التأثير حيث بلغت مساحتها (١٦٣٠ كم<sup>٢</sup>) وهو ما يمثل الغالبية العظمى من مساحة المنطقة ويعكس هذا النمط أن النظام البيئي في قضاء كلار يتمتع بدرجة ملحوظة من الاستقرار النسبي، حيث إن الغطاء النباتي قادر على التكيف مع التذبذب المناخي دون أن يتعرض لتدهور واضح في المقابل، ظهرت مساحات ضمن فئة الهشاشة البيئية (١٢٣.٩ كم<sup>٢</sup>) وهي مناطق انتقالية تنتم بحساسية أعلى نسبياً للتغيرات المناخية، وقد تكون أكثر عرضة للتدهور البيئي في حال استمرار الضغوط المناخية أو زيادة التأثيرات البشرية.

خريطة (١١) مستويات الاستقرار والهشاشة البيئية في قضاء كلار



المصدر: بالاعتماد على تحليل معطيات المرئية الفضائية لمنطقة البحث (٢٠٠٠ - ٢٠٢٥) وبدقة ٣٠ م

أما فئة شديد الهشاشة فقد كانت محدودة جداً، إذ لم تتجاوز مساحتها نحو (٠.١٣ كم<sup>٢</sup>)، مما يشير إلى أن المناطق الأكثر عرضة للتدهور البيئي داخل قضاء كلار تتركز في نطاقات مكانية صغيرة للغاية في حين ظهرت مساحات محدودة ضمن فئة الاستقرار البيئي (مستقر) بلغت نحو (٠.٩٢ كم<sup>٢</sup>)، وهي مناطق يتمتع فيها النظام البيئي بدرجة عالية من القدرة على مقاومة التغيرات المناخية والحفاظ على توازنه البيئي،

وبصورة عامة، تؤكد نتائج هذا البحث أن تحليل ديناميكيات النظم البيئية باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد والنمذجة المكانية يوفر أدوات فعالة لفهم التغيرات البيئية في المناطق الجافة وشبه الجافة. كما تسهم هذه الأساليب في تحديد المناطق الأكثر عرضة للتدهور البيئي، وهو ما يساعد في دعم جهود التخطيط البيئي وإدارة الموارد الطبيعية في منطقة البحث كما وتشير هذه النتائج إلى أن نموذج مخاطر التصحر الذي تم بناؤه في هذا البحث يمتلك قدرة تفسيرية جيدة، إذ تتطابق مناطق التراجع النباتي التي ظهرت خلال فترة التحقق مع بعض النطاقات التي حددها النموذج بوصفها مناطق أكثر هشاشة بيئية، ويعزز هذا التطابق من موثوقية النموذج المكاني المستخدم في تقييم مخاطر التصحر في منطقة البحث، وبشكل عام، يمكن القول إن النظام البيئي في قضاء كلار لا يظهر مؤشرات على حدوث تصحر واسع النطاق خلال الفترة المدروسة، إلا أن وجود نطاقات محدودة من التدهور النباتي يشير إلى ضرورة مراقبة هذه المناطق وإدارتها بيئياً لتجنب تحولها إلى بؤر محتملة للتدهور البيئي في المستقبل.

#### الاستنتاجات

١. أظهرت نتائج تحليل الاتجاه طويل الأمد للتغير في الغطاء النباتي (٢٠٠٠-٢٠٢٥) وجود تباين مكاني في اتجاهات التغير النباتي داخل قضاء كلار، إذ تركزت المساحة الأكبر ضمن فئة التحسن الطفيف وبلغت مساحتها (١١٠٨.٧٩ كم<sup>٢</sup>)، في حين بلغت مساحة التدهور الطفيف (٦٢٤.٥٣ كم<sup>٢</sup>)، مما يعني وجود ميل عام نحو التحسن النسبي في النشاط النباتي في منطقة البحث.
٢. أظهر تحليل التغير خلال مرحلة التعافي بين عامي (٢٠٠٨-٢٠١٨) أن النظام البيئي في قضاء كلار يمتلك قدرة ملحوظة على استعادة نشاطه الحيوي بعد صدمة الجفاف، حيث بلغت مساحة التحسن الطفيف (٧٩٠.٥١ كم<sup>٢</sup>) في حين بلغت مساحة التحسن الواضح (١١٩.٦٣ كم<sup>٢</sup>).
٣. كشفت نتائج تحليل مقاومة النظام البيئي لصدمة الجفاف بين عامي (٢٠٠٦ و ٢٠٠٨) أن معظم مساحة منطقة البحث تقع ضمن (المقاومة المتوسطة) بلغت (١٧٣٢.٣ كم<sup>٢</sup>) مما يعني قدرة الغطاء النباتي في المنطقة على تحمل الصدمات المناخية دون حدوث انهيار واسع في الإنتاجية النباتية.
٤. أظهر تحليل التعافي البيئي أن النظام البيئي في القضاء يمتلك القدرة على استعادة نشاطه الحيوي بعد فترات الجفاف، حيث تركزت المساحة الأكبر ضمن فئة التعافي المرتفع .
٥. أظهر نموذج مخاطر التصحر أن غالبية مساحة منطقة البحث تقع ضمن فئة الخطر المنخفض للتصحر وبمساحة (١٦٣٠.٣ كم<sup>٢</sup>) في حين بلغت مناطق الخطر المتوسط (١٢٣.٩ كم<sup>٢</sup>)، أما مناطق الخطر المرتفع فقد كانت محدودة جداً.

٦. بين اختبار التحقق نموذج مخاطر التصحر وجود توافق ملحوظ بين نتائج النموذج والتغيرات الفعلية في الغطاء النباتي خلال الفترة (٢٠١٨-٢٠٢١) حيث تركزت المساحة الأكبر ضمن فئة التحسن الطفيف التي بلغت (١٦٤٣ كم<sup>٢</sup>) مما يعزز موثوقية النموذج المستخدم في هذا البحث.

#### التوصيات

١. تعزيز برامج إدارة الموارد الطبيعية في المناطق التي أظهرت حساسية مناخية مرتفعة أو مرونة بيئية منخفضة، وذلك من خلال تطبيق ممارسات الإدارة المستدامة للأراضي والعمل على مراقبة المناطق التي ظهرت ضمن فئة الخطر المتوسط للتصحر في نموذج المخاطر، إذ يمكن أن تتحول إلى بؤر للتدهور البيئي في حال استمرار الضغوط المناخية أو زيادة الضغط البشري.
٢. تشجيع برامج إعادة تأهيل الغطاء النباتي في المناطق التي أظهرت تراجعاً في النشاط النباتي، وذلك من خلال دعم الغطاء النباتي الطبيعي والحد من عمليات الرعي الجائر مع تعزيز جهود حماية التربة والحد من تدهورها من خلال تطبيق ممارسات الإدارة المستدامة للتربة، مثل تنظيم استخدام الأراضي الزراعية والحد من التعرية.
٣. دعم إنشاء نظام رصد بيئي مستمر يعتمد على تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية لمتابعة التغيرات التي تطرأ على الغطاء النباتي بصورة دورية.
٤. تعزيز التعاون بين الجهات البيئية والزراعية في تطوير برامج إدارة الأراضي بما يضمن تحقيق التوازن بين الأنشطة البشرية والحفاظ على استقرار النظام البيئي.
٥. اعتماد نتائج نماذج تقييم مخاطر التصحر في وضع الخطط التنموية وإدارة الأراضي في قضاء كلارك، بما يسهم في توجيه الجهود التنموية نحو المناطق الأكثر استقراراً بيئياً مع تطوير نماذج أكثر تقدماً لتقييم مخاطر التصحر من خلال دمج البيانات المناخية طويلة الأمد والبيانات الهيدرولوجية وإجراء دراسات مقارنة بين مناطق مختلفة في إقليم كردستان وباقي اجزاء العراق لفهم التباين المكاني في استجابة النظم البيئية للتغيرات المناخية

#### References:

1. Reynolds, J. F., Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner II, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P., et al. (2007). *desertification: Building a science for dryland development*. *Science*(5826), pp. 847-851.
2. Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin III, F. S., & Rockström, J. (2004). *Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability*. *Ecology and Society*(2), pp. 5-18.
3. Holling, C. S. (1973). *Resilience and stability of ecological systems*. (4), pp. 1-23.
4. Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2005). *Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions*. (28), pp. 205-241.
5. Pettorelli, N. (2005). *Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change*. 9, pp. 580-615.
6. Pontius Jr., R. G., & Schneider, L. C. (n.d.). *Land-use change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*(1-3), pp. 239-248.

7. Reynolds, J. F. (2007 p 847). *Global desertification: Building a science for dryland development*. Science, 316(5826),.
  8. Walker, B. H. (2005). (2004). *Resilience, adaptability and transformability in social–*, 9(2), 5. (5), pp. 56-79.
  9. Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. (2007). *Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems*. Ecology and Society(2), p. 5.
  10. Wilhite, D. A. (1985). *Understanding the drought phenomenon*. Water International, 10(3), p. 117.
١١. الشلبي، محمد عبد الرحمن. (٢٠١٤). التصحر: أسبابه وآثاره وطرق مكافحته. القاهرة: دار الفكر العربي.
١٢. أبو العز، محمد عبد القادر. (٢٠٠٦). جغرافية البينات الجافة. القاهرة: دار النهضة العربية.